

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки – 15.03.06 Мехатроника и робототехника
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Система определения положения технических объектов на основе Bluetooth
УДК 004728.1:681.51.075

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8E71	Рубан Евгений Павлович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Филипас Александр Александрович	к.т.н., доцент		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОАР ИШИТР	Беляев Александр Сергеевич			

КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Дукарт Сергей Александрович	к.и.н., доцент		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД ШБИП	Аверкиев Алексей Анатольевич			

ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Мамонова Татьяна Егоровна	к.т.н., доцент		

Томск – 2021 г.

ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОСВОЕНИЯ ООП

Код компетенции	Наименование компетенции
Общекультурные (универсальные) компетенции	
УК(У)-1	Способен осуществлять поиск, критический анализ и синтез информации, применять системный подход для решения поставленных задач
УК(У)-2	Способен определять круг задач в рамках поставленной цели и выбирать оптимальные способы их решения, исходя из действующих правовых норм, имеющихся ресурсов и ограничений
УК(У)-3	Способен осуществлять социальное взаимодействие и реализовывать свою роль в команде
УК(У)-4	Способен осуществлять деловую коммуникацию в устной и письменной формах на государственном языке Российской Федерации и иностранном(-ых) языке(-ах)
УК(У)-5	Способен воспринимать межкультурное разнообразие общества в социально-историческом, этическом и философском контекстах
УК(У)-6	Способен управлять своим временем, выстраивать и реализовывать траекторию саморазвития на основе принципов образования в течение всей жизни
УК(У)-7	Способен поддерживать должный уровень физической подготовленности для обеспечения полноценной социальной и профессиональной деятельности
УК(У)-8	Способен создавать и поддерживать безопасные условия жизнедеятельности, в том числе при возникновении чрезвычайных ситуаций
Общепрофессиональные компетенции	
ОПК(У)-1	Способен представлять адекватную современному уровню знаний научную картину мира на основе знания основных положений, законов и методов естественных наук и математики
ОПК(У)-2	Владеет физико-математическим аппаратом, необходимым для описания мехатронных и робототехнических систем
ОПК(У)-3	Владеет современными информационными технологиями, готовностью применять современные средства автоматизированного проектирования и машинной графики при проектировании систем и их отдельных модулей, а также для подготовки конструкторско-технологической документации, соблюдать основные требования информационной безопасности

Код компетенции	Наименование компетенции
ОПК(У)-4	Готов собирать, обрабатывать, анализировать и систематизировать научно-техническую информацию по тематике исследования, использовать достижения отечественной и зарубежной науки, техники и технологии в своей профессиональной деятельности
ОПК(У)-5	Способен использовать основы экономических знаний при оценке эффективности результатов своей профессиональной деятельности
ОПК(У)-6	Способен решать стандартные задачи профессиональной деятельности на основе информационной и библиографической культуры с применением информационно-коммуникационных технологий и с учетом основных требований информационной безопасности
Профессиональные компетенции выпускников	
ПК(У)-1	Способен составлять математические модели мехатронных и робототехнических систем, их подсистем и отдельных элементов и модулей, включая информационные, электромеханические, гидравлические, электрогидравлические, электронные устройства и средства вычислительной техники
ПК(У)-2	Способен разрабатывать программное обеспечение, необходимое для обработки информации и управления в мехатронных и робототехнических системах, а также для их проектирования
ПК(У)-3	Способен разрабатывать экспериментальные макеты управляющих, информационных и исполнительных модулей мехатронных и робототехнических систем и проводить их экспериментальное исследование с применением современных информационных технологий
ПК(У)-4	Способен осуществлять анализ научно-технической информации, обобщать отечественный и зарубежный опыт в области средств автоматизации и управления, проводить патентный поиск
ПК(У)-5	Способен проводить эксперименты на действующих макетах, образцах мехатронных и робототехнических систем по заданным методикам и обрабатывать результаты с применением современных информационных технологий и технических средств
ПК(У)-6	Способен проводить вычислительные эксперименты с использованием стандартных программных пакетов с целью исследования математических моделей мехатронных и робототехнических систем

Код компетенции	Наименование компетенции
ПК(У)-7	Готов участвовать в составлении аналитических обзоров и научно-технических отчетов по результатам выполненной работы, в подготовке публикаций по результатам исследований и разработок
ПК(У)-8	Способен внедрять результаты исследований и разработок и организовывать защиту прав на объекты интеллектуальной собственности
ПК(У)-9	Способен участвовать в качестве исполнителя в научно-исследовательских разработках новых робототехнических и мехатронных систем
ПК(У)-10	Готов участвовать в подготовке технико-экономического обоснования проектов создания мехатронных и робототехнических систем, их подсистем и отдельных модулей
ПК(У)-11	Способен производить расчеты и проектирование отдельных устройств и подсистем мехатронных и робототехнических систем с использованием стандартных исполнительных и управляющих устройств, средств автоматики, измерительной и вычислительной техники в соответствии с техническим заданием
ПК(У)-12	Способен разрабатывать конструкторскую и проектную документацию механических, электрических и электронных узлов мехатронных и робототехнических систем в соответствии с имеющимися стандартами и техническими условиями
ПК(У)-13	Готов участвовать в проведении предварительных испытаний составных частей опытного образца мехатронной или робототехнической системы по заданным программам и методикам и вести соответствующие журналы испытаний
ДПК (У)-1	Способен проводить проверку технического состояния оборудования, настройку систем управления и обработки информации с использованием соответствующих инструментальных средств

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
 Направление подготовки – 15.03.06 Мехатроника и робототехника
 Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники
 Период выполнения – весенний семестр 2021 учебного года

Форма представления работы:

Бакалаврская работа

КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	01.06.2021
--	------------

Дата контроля	Название раздела(модуля)/ вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
	Основная часть	60
	Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	20
	Социальная ответственность	20

СОСТАВИЛ:

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Филипас А. А.	К.Т.Н., доцент		

Консультант

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОАР ИШИТР	Беляев А.С.			

СОГЛАСОВАНО:

Руководитель ООП

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОАР ИШИТР	Мамонова Татьяна Егоровна	К.Т.Н., доцент		

Школа – Инженерная школа информационных технологий и робототехники
Направление подготовки (специальность) – 15.03.06 «Мехатроника и робототехника»
Отделение школы (НОЦ) – Отделение автоматизации и робототехники

Руководитель ООП

(Подпись)

(Дата)

Мамонова Т.Е.
(Ф.И.О.)

В форме:

Бакалаврской работы

(бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)

Студенту:

Группа	ФИО
8E71	Рубан Евгений Павлович

Тема работы:

Система определения положения технических объектов на основе Bluetooth

Утверждена приказом директора (дата, номер)

№ 50-13/с от 19.02.2021

Срок сдачи студентом выполненной работы:

ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:

Исходные данные к работе

(наименование объекта исследования или проектирования; производительность или нагрузка; режим работы (непрерывный, периодический, циклический и т. д.); вид сырья или материал изделия; требования к продукту, изделию или процессу; особые требования к особенностям функционирования (эксплуатации) объекта или изделия в плане безопасности эксплуатации, влияния на окружающую среду, энергозатратам; экономический анализ и т. д.).

Объектом разработки является стенда с системой локального позиционирования по Bluetooth на двумерной плоскости.

Разработка программно-аппаратного обеспечения для локального позиционирования должна проводиться с учётом имеющейся лабораторной базы, а именно:

- микроконтроллеры ESP32, 5 штук;
- компьютер, оснащённый ОЗУ объемом не менее 4 ГБ и USB Type A в количестве не менее 1 разъёма.

Программное-аппаратное обеспечение должно отвечать следующим требованиям:

- предоставление текущей информации о положении искомого модуля на заданной площади;

	<ul style="list-style-type: none"> предоставление текущей информации о силе сигнала, принимаемой с каждой из опорных маячков.
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов <i>(аналитический обзор по литературным источникам с целью выяснения достижений мировой науки техники в рассматриваемой области; постановка задачи исследования, проектирования, конструирования; содержание процедуры исследования, проектирования, конструирования; обсуждение результатов выполненной работы; наименование дополнительных разделов, подлежащих разработке; заключение по работе).</i>	1) Обзор и анализ существующих методов и технологий, применяемых для позиционирования по Bluetooth; 2) Проектирование архитектуры системы позиционирования; 3) Создание стенда системы локального позиционирования; 4) Реализация методов позиционирования и фильтрации данных; 5) Разработка программного обеспечения; 6) Проектирование алгоритмов определения позиции и их сравнение; 7) Проведение испытаний системы позиционирования и анализ полученных результатов.
Перечень графического материала <i>(с точным указанием обязательных чертежей)</i>	Блок схемы алгоритмов.
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы <i>(с указанием разделов)</i>	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Дукарт Сергей Александрович
Социальная ответственность	Аверкиев Алексей Анатольевич
Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:	
Заключение	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ОАР ИШИТР	Беляев Александр Сергеевич			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8E71	Рубан Евгений Павлович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»

Студенту:

Группа	ФИО
8E71	Рубан Евгений Павлович

Школа	ИШИТР	Отделение школы (НОЦ)	Отделение автоматизации и робототехники
Уровень образования	Бакалавр	Направление/специальность	15.03.06 Мехатроника и робототехника

Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:

1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих	Бюджет проекта – не более 1 млн. руб., в т.ч. затраты по оплате труда – не более 500 тыс. руб.
2. Нормы и нормативы расходования ресурсов	Значение показателя интегральной ресурсоэффективности – не менее 4 баллов из 5.
3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования	Пропорциональная система налогообложения.

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

1. Планирование и формирование бюджета научных исследований	Необходимо составить календарный план НИ и рассчитать затраты НИ.
2. Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования	С позиции ресурсоэффективности и финансовой эффективности необходимо сравнить текущий проект с тремя аналогами.

Перечень графического материала:

1. Оценка конкурентоспособности технических решений
2. Матрица SWOT
3. График проведения и бюджет НИ
4. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Дукарт Сергей Александрович	к.и.н., доцент		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8E71	Рубан Евгений Павлович		

ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
8E71	Рубан Евгений Павлович

Школа	ИШИТР	Отделение (НОЦ)	Отделение автоматизации и робототехники
Уровень образования	Бакалавриат	Направление/специальность	15.03.06 Мехатроника и робототехника

Тема ВКР:

Система определения положения технических объектов на основе Bluetooth	
Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объектом исследования является система локального позиционирования по Bluetooth. Рабочим местом разработчика является аудитория 101 корпуса №10 ТПУ
Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:	
1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности: <ul style="list-style-type: none"> – специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; – организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны. 	<p>Трудовой кодекс Российской Федерации от 30.12.2001 N 197-ФЗ (ред. от 05.02.2018).</p> <p>Требования к организации оборудования рабочих мест с ПК регулируется СП 2.2.3670-20.</p> <p>Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования ГОСТ 12.2.032-78.</p> <p>Система "Человек-машина". Кресло человека-оператора. Общие эргономические требования ГОСТ 21889-76.</p> <p>Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы ГОСТ 12.0.003-2015.</p>
2. Производственная безопасность: 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	<p>Анализ выявленных опасных факторов:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Поражение электрическим током; – Повышенный уровень ЭМП; – Недостаточная освещённость; – Отсутствие или недостаток естественного света; – Отклонение показателей микроклимата; – Опасные химические вещества; – Повышенный уровень шума.
3. Экологическая безопасность:	<ul style="list-style-type: none"> – Атмосфера: вредные выбросы при производстве и установке составных элементов сети станций;

	– Литосфера: загрязнение почвы при утилизации элементов системы; – Гидросфера: воздействие маловероятно.
4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:	ЧС техногенного характера – пожар (возгорание)

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
---	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ООД ШБИП	Аверкиев Алексей Анатольевич	-		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8E71	Рубан Евгений Павлович		

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа выполнена на 139 страницах, содержит 42 рисунка, 37 таблиц, 83 источника литературы, 1 приложение.

Ключевые слова: система локального позиционирования, Bluetooth, трилатерация, received signal strength, алгоритм, разработка.

Объектом исследования является система локального позиционирования по Bluetooth.

Цель работы – создание системы локального позиционирования по Bluetooth.

В процессе исследования были рассмотрены методы, используемые в системах локального позиционирования. Были разработаны структурная и функциональная схемы системы. В программном обеспечении был реализован алгоритм вычисления позиции на основе мощности принимаемого сигнала, методы фильтрации, оценки позиции. На основе экспериментальных данных были найдены требуемые параметры настройки системы. Также был создан графический интерфейс программы. Были спроектированы и протестированы некоторые конфигурации системы. Тестирование программы происходило на стенде из микроконтроллеров со встроенным Bluetooth модулем.

Основные конструктивные, технологические и технико-эксплуатационные характеристики: снижение трудозатрат на масштабирование системы; открытость программного кода; настраиваемость и автоматизация обработки и сбора данных.

Степень внедрения: программное обеспечение опробовано на стенде, собранном из сети микроконтроллеров со встроенным Bluetooth.

Область применения: промышленные, торговые, культурные, социальные и другие объекты.

Экономическая эффективность/значимость работы: снижение финансовых и трудовых затрат на внедрение системы на малых предприятиях.

В будущем планируется продолжение работы по данной тематике.

Содержание

Определения, обозначения, сокращения.....	16
Введение	18
1 1 Комплексный обзор материалов по тематике ВКР	21
1.1 Обзор рынка на предмет аналогов	21
1.1.1 Система позиционирования RealTrac	21
1.1.2 Система позиционирования Cisco Hyperlocation	21
1.1.3 Система позиционирования Navigine	22
1.1.4 Сравнение аналогов	22
1.2 Обзор методов и инструментов разработки систем локального позиционирования	23
1.2.1 Bluetooth в контексте позиционирования.....	23
1.2.2 Радиолокационные методы позиционирования.....	27
1.2.2.1 Radio Signal Strength	28
1.2.2.2 Иные методы позиционирования	34
1.2.3 Прочие методы оценки позиции	35
1.2.3.1 Метод роя частиц	35
1.2.3.2 WCL	37
1.2.3.3 Fingerprinting	38
1.2.3.4 Другие методы оценки позиции	38
1.2.4 Фильтрация измерений	39
1.2.4.1 Фильтр скользящего среднего	40
1.2.4.2 Адаптивная скользящая средняя Кауфмана	42
1.2.4.3 Медианный фильтр	43
1.2.4.4 Фильтр Калмана	44

2 Проектирование системы локального позиционирования	48
2.1 Разработка структурной схемы системы	48
2.2 Выбор элементов системы	54
2.2.1 Выбор базовых и искомой станций.....	54
2.2.2 Выбор сервера и монитора.....	55
2.2.3 Выбор инструментов разработки ПО для сервера	56
2.2.4 Выбор шаблона проектирования архитектуры ПО	58
2.2.5 Источник питания для микроконтроллеров	59
2.3 Разработка функциональной схемы системы.....	60
3 Разработка системы локального позиционирования	62
3.1 Разработка макета поля для позиционирования	62
3.2 Разработка программы для искомой станции	63
3.3 Разработка программы для базовых станций	63
3.4 Разработка программы для сервера	64
3.5 Поиск наилучших параметров	74
3.5.1 Поиск параметров для функции расстояния	75
3.5.2 Поиск параметров для фильтров	77
3.5.3 Поиск параметров для методов оценки позиции	81
4 Анализ разработанной системы	84
4.1.1 Тестирование разработанной системы.....	84
4.1.2 Сравнение разработанной системы с аналогами	89
5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	92
5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности.....	92
5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследований	92

5.1.2 Анализ конкурентных технических решений	93
5.1.3 SWOT-анализ.....	94
5.2 Планирование научно-исследовательских работ.....	97
5.2.1 Структура работ в рамках научного исследования	97
5.2.2 Разработка графика проведения научного исследования.....	99
5.3 Бюджет научного исследования (НТИ)	101
5.3.1 Расчет материальных затрат НТИ.....	102
5.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ.....	103
5.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы.....	103
5.3.4 Дополнительная заработная плата	105
5.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) .	105
5.3.6 Накладные расходы	106
5.3.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта	106
5.4 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования.....	107
6 Социальная ответственность	111
6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .	111
6.2 Производственная безопасность	113
6.2.1 Поражение электрическим током	113
6.2.2 Повышенный уровень ЭМП.....	114
6.2.3 Недостаточная освещённость и отсутствие или недостаток естественного света	115
6.2.4 Отклонение показателей микроклимата.....	116
6.2.5 Опасные химические вещества	117

6.2.6 Повышенный уровень шума	118
6.3 Экологическая безопасность	119
6.3.1 Атмосфера	119
6.3.2 Литосфера.....	120
6.3.3 Гидросфера	120
6.4 Безопасность в ЧС	121
6.5 Заключение по разделу социальной ответственности	122
Заключение.....	123
Conclusion.....	124
Список использованных источников	125
Приложение А (обязательное) Алгоритмы работы станций	136

Определения, обозначения, сокращения

В представляемой работе использовались следующие термины с соответствующими определениями:

BLE (Bluetooth low energy) – стандарт Bluetooth с низким энергопотреблением, технология Bluetooth, предназначенная для устройств без постоянного подвода питающего напряжения, либо устройств, работающих от батарей аккумуляторов малой емкости;

Трилатерация – метод определения позиции, основанный на измерении расстояния между базовыми узлами и меткой [1];

Триангуляция – метод определения позиции, основанный на измерении углов между базовыми узлами и меткой [1].

Метод оценки позиции – это метод, который позволяет вычислять координаты ИС через известные координаты БС, какие-либо измерения, позволяющие делать суждения о положении ИС (расстояние между ИС и БС, уровень мощности принимаемого сигнала, угол прихода сигнала или др.) и параметры, характерные для данного метода;

ToA (Time of Arrival) – это метод позиционирования, основанный на трилатерации, предполагающий измерение задержки распространения радиосигнала между ИС и БС [1];

TDoA (Time Difference of Arrival) – это метод позиционирования, основанный на трилатерации, предполагающий измерение разницы задержки распространения сигнала между ИС и БС [1];

RSS (Radio Signal Strength) – это метод позиционирования, основанный на измерении мощности сигнала, испущенного искомой станцией и принятого базовыми станциями [1];

SSDoA (Signal Strength Difference on Arrival) – это метод позиционирования, основанный на измерении мощности сигнала, испущенного ИС и принятого разными БС [2];

RSSI (Received Signal Strength Indicator) – показатель уровня принимаемого сигнала, равный полной мощности принимаемого приёмником

сигнала. Измеряется в дБм (децибел относительно 1 милливатта). Отношение RSSI в дБм и мощностью в мВт описывается соотношением [3]:

$$RSSI \text{ [дБм]} = 10 \cdot \lg \left(\frac{P[\text{мВт}]}{1[\text{мВт}]} \right). \quad (1)$$

В представляемой работе использовались следующие обозначения для удобства составления текста, его проверки и оценки:

$q \in \mathbb{R}^n$ положение ИС, которое необходимо найти;

$s_i \in \mathbb{R}^n$ положение i -ой БС, которое известно заранее;

$n \in \mathbb{N}$ – количество искомых координат (для двухмерного пространства $n = 2$, для трёхмерного – $n = 3$);

$\rho_i \in \mathbb{R}^+$ – расстояние между i -ой БС и ИС.

Вектор q будем рассматривать как вектор, состоящий из декартовых координат. Если рассматривать позиционирование на двухмерной плоскости, тогда $n = 2$ и вектор q будет равен $q = [x \ y]^T$. Для трёхмерного случая $n = 3$ и вектор q будет равен $q = [x \ y \ z]^T$. Аналогично обозначим позиции БС. Позиция i -го БС равна $s_i = [x_i \ y_i]^T$ или $s_i = [x_i \ y_i \ z_i]^T$, $i = 1, \dots, m$, где m – количество БС.

Для обозначения величин, полученных в результате измерений для отличия от истинных, обозначим шляпкой сверху. Например. q – истинные координаты ИС, \hat{q} – измеренные координаты ИС.

В представляемой работе использовались следующие сокращения для удобства составления текста, его проверки и оценки:

Искомая станция (ИС) (англ. target node) – радиоэлектронное устройство, участвующее в процессе позиционирования, координаты которого являются искомыми;

Базовая станция (БС), (или анкор, англ. base node) – радиоэлектронное устройство, участвующий в процессе позиционирования, локальные координаты которого известны;

Введение

В современном мире всё более актуальными становятся идеи об автоматизации и цифровизации производств. В этой тенденции особое место занимает применение систем локального позиционирования, т.к. они способны решать целый массив задач. Данная технология может широко применяться на промышленный, торговых, культурных, социальных и других объектах. В зависимости от потребностей данная система способна вывести на новый уровень такие задачи, как обеспечение безопасности, сбор статистических данных, информирование, навигация и другие.

Высокий интерес к внедрению таких систем проявляют в сфере бизнеса и социальной сфере. Например, в торговых центрах данная система позволяет производить анализ предпочтений пользователей, зная которые, можно корректировать точки притяжения внутри помещения, улучшать зонирование, ранжировать арендную плату для арендаторов и многое другое. Пользователи также могут получить выгоду от системы в виде навигации по помещению, уведомлений в зависимости от положения.

Производства, логистические центры и склады также могут найти данную систему крайне выгодной. Поскольку система локального позиционирования позволяет контролировать местоположение рабочих, техники и грузов на территории предприятия, контролировать уровни доступа рабочих в определённые зоны, контролировать рабочее время, осуществлять аварийное оповещение персонала, контролировать процесс эвакуации. Кроме того, для горно-рудных предприятий важным побудителем к применению систем позиционирования на предприятиях является требование федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору, выраженное в пунктах 76 и 77 правил безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых, заключающееся в том, что шахты должны быть оборудованы системами позиционирования и поиска работников [4].

В рамках локального позиционирования выгодно выделяется технология Bluetooth. Рассмотрим характеристики, которые позволяют рассматривать

Bluetooth в качестве выгодного решения для основы систем локального позиционирования:

1. данная технология используется во множестве современных персональных устройствах, таких как телефоны, смартфоны, компьютеры, ноутбуки, наушники, умные носимые устройства и другие;
2. сигнал Bluetooth способен проходить сквозь препятствия в отличие от, например, инфракрасного излучения;
3. скорость передачи данных у Bluetooth порядка нескольких Мбит/с;
4. BLE позволяет сократить энергопотребление в (2–100) раз по сравнению с классическим Bluetooth;
5. радиус действия может достигать 45 метров.

Недостатком Bluetooth является то, что данная технология изначально не разрабатывалась для целей позиционирования. Однако на текущий момент была выпущена версия Bluetooth 5.2, которая реализует потенциал Bluetooth в данной области.

Таким образом система локального позиционирования на основе Bluetooth является эффективным решением для сфер коммерции, промышленности, добычи полезных ископаемых и других ввиду её простоты, экономичности, доступности и эффективности.

Целью данной работы является создание системы локального позиционирования по Bluetooth. Задачи, которые были поставлены для этого:

1. обзор существующих аналогов;
2. обзор и анализ существующих методов и инструментов, применяемых для позиционирования по Bluetooth;
3. проектирование структурной и функциональной схем системы, а также выбор элементов системы;
4. создание стенда для позиционирования;
5. разработка программного обеспечения для микроконтроллеров и компьютера;
6. реализация методов позиционирования и фильтрации данных;

7. проведение испытаний системы позиционирования.

1 1 Комплексный обзор материалов по тематике ВКР

1.1 Обзор рынка на предмет аналогов

Рассмотрим имеющиеся на рынке системы локального позиционирования и выясним их преимущества и недостатки, чтобы выявить ключевые проблемы, что позволит предложить новое усовершенствованное решение.

1.1.1 Система позиционирования RealTrac

RealTrac – это российская компания, основанная группой учёных на базе петрозаводского государственного университета [5]. На текущий момент компания предлагает решения для различных отраслей:

- шахты, рудники и подземная добыча;
- карьеры, разрезы и открытая добыча;
- производства и перерабатывающие предприятия;
- логистические центры и склады;
- медицинские центры и больницы;
- индивидуальные решения на заказ.

Данная компания проводит разработку систем позиционирования, который могут дополнительно включать передачу данных между объектами, голосовую связь, интеграцию в систему интернета вещей. Предлагаемый комплекс решений включает как физические устройства, так и программное обеспечение.

1.1.2 Система позиционирования Cisco Hyperlocation

Cisco – американская транснациональная компания, которая является мировым лидером в области информационных технологий и сетей [6]. Компания предлагает множество решений, среди которых имеется система Cisco Hyperlocation. Cisco Hyperlocation использует устройства Cisco Aironet в качестве физического устройства, принимающего сигналы от отслеживаемых объектов, а также некоторые инструменты для программной поддержки.

1.1.3 Система позиционирования Navigine

Navigine является глобальным поставщиком интегрированных технологий навигации внутри и вне помещений, основанным в Москве. Navigine представляет собой универсальную программную платформу, решающую широкий спектр задач в области позиционирования [7]. Компания предлагает программные решения, которые могут использоваться с физическими устройствами сторонних производителей.

1.1.4 Сравнение аналогов

Для сравнения представленных выше аналогов составим таблицу, в которой будут наглядно представлены все плюсы и минусы данных решений. Сравнительный анализ представлен в таблице 1.

Таблица 1 – Сравнение аналогов

Параметр	Navigine	Cisco Hyperlocation	RealTrac
Программное обеспечение	+	+	+
SDK	+	-	-
API	-	+	+
Собственные устройства позиционирования	-	+	+
Сторонние устройства позиционирования	Ограниченный список	-	-
Инструменты настройки карты	+	-	+
Хранение данных	На сервере Navigine	На собственном сервере	На собственном сервере

По сравнительной таблице видно, что продукты RealTrac и Cisco Hyperlocation представляют собой системы, завязанные на собственных

продуктах, хотя для работы их устройств со сторонними приложениями можно использовать предоставляемое API. Navigine, концентрируясь на программной стороне вопроса делегирует производство физических устройств партнёрам, что значит, что список подключаемых устройств шире, но также ограничен. Недостатком Navigine является то, что данные системы отправляются на сервера Navigine, что делает невозможным использование в отраслях с повышенной секретностью. Плюсом Navigine является то, что компания предлагает как готовые решения, так и SDK для разработки собственных программных решений.

Все рассмотренные системы работают только с поддерживаемым кругом физических устройств. Улучшением может быть создание программного обеспечения, которое будет давать возможность интегрировать любые устройства с открытыми или самописными API, хранить данные исключительно на доверительных серверах, а также быть открытой разработкой, доступной для улучшения любому желающему.

1.2 Обзор методов и инструментов разработки систем локального позиционирования

1.2.1 Bluetooth в контексте позиционирования

Рассмотрим технологию Bluetooth подробнее, уделив большое внимание применимости данной технологии в радиолокационном позиционировании. Bluetooth это спецификация беспроводных персональных сетей, описываемая стандартами IEEE 802.15.1, работающая в частотном диапазоне (2.4-2.4835) ГГц. Эта система является активной, и она используется для локального позиционирования внешних объектов с вычислительным центром, расположенным внутри или вне ИС. Bluetooth не является технологией, которая изначально была предназначена для позиционирования. Отсюда вытекают некоторые ограничения применения данной технологии.

Bluetooth применяется для трёх основных целей:

1. обеспечение точки доступа для чтения/записи данных;

2. замена проводных соединений;
3. организация эпизодических сетей [8].

Частота 2.4 ГГц применяется множеством устройств повсеместно (Wi-Fi, Bluetooth и другие), что создаёт опасность появления помех при работе выбранных для позиционирования Bluetooth модулей. В действительности это не является большой проблемой, т.к. Bluetooth использует надёжные алгоритмы, которые защищают систему от вмешательства иных сигналов.

Исследования показывают, что точность определения позиции с помощью Bluetooth составляет от нескольких метров до нескольких десятков метров. Полноценное исследование точности позиционирования по Bluetooth представлено в работе [9], из которой следует, что по сравнению с Wi-Fi и ZigBee Bluetooth имеет наихудшие показатели максимальной ошибки и разброса, при этом лучше всего позиционирование по Bluetooth работает на открытой области. Точность позиционирования по Bluetooth в сравнении с другими технологиями представлена на рисунке 1.

Данная технология подходит для определения позиции в рамках зданий или фабрик. Сигнал Bluetooth может передаваться на дистанции от менее 5 м до более 45 м в зависимости от чувствительности приёмника, мощности испускаемого сигнала, потерь мощности сигнала в окружающей среде, а также характеристик антенн приёмника и излучателя [10]. На рисунке 2 представлено сравнение рабочего диапазона различных технологий.

Bluetooth имеет несколько свойств, которые могут быть использованы для определения позиции: время распространения и мощность сигнала. То есть для позиционирования по Bluetooth могут быть применены методы ToA, TDoA, RSS и SSDoA. На сегодняшний день применение метода RSS является наиболее распространённым для позиционирования по Bluetooth. Измерение мощности принимаемого и испускаемого сигнала доступно для всех Bluetooth модулей. Мощность принимаемого сигнала именуется как RSSI (Received Signal Strength Indicator) и измеряется в дБм (децибел на милливатт).

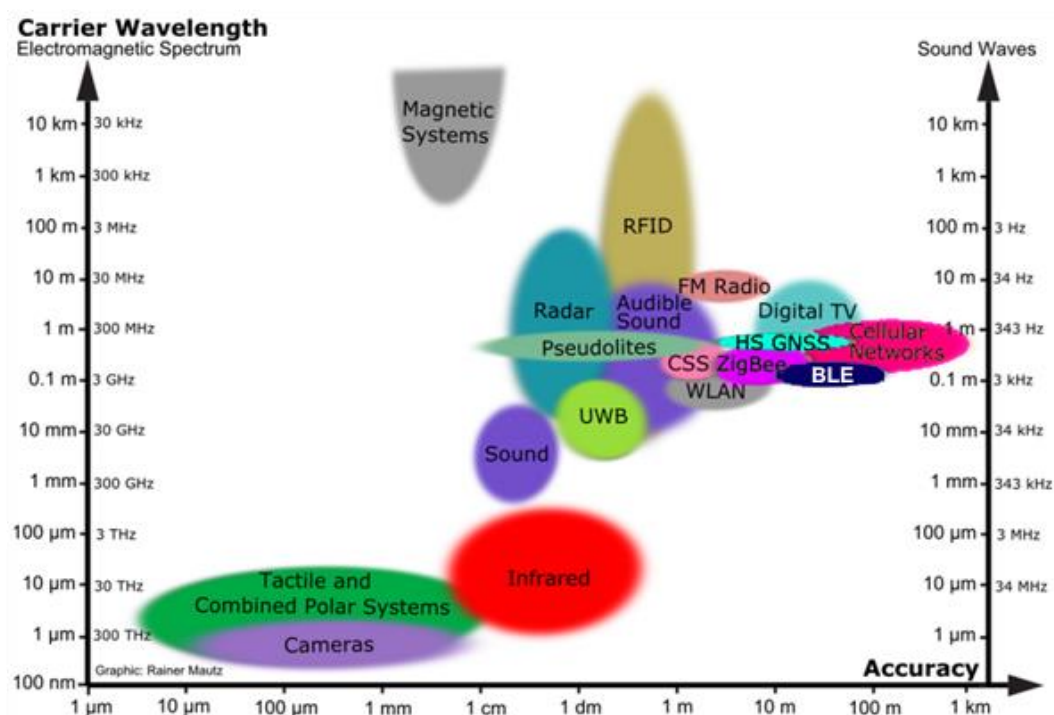


Рисунок 1 – Технологии локального позиционирования в зависимости от длины волн сигнала и точности [11]

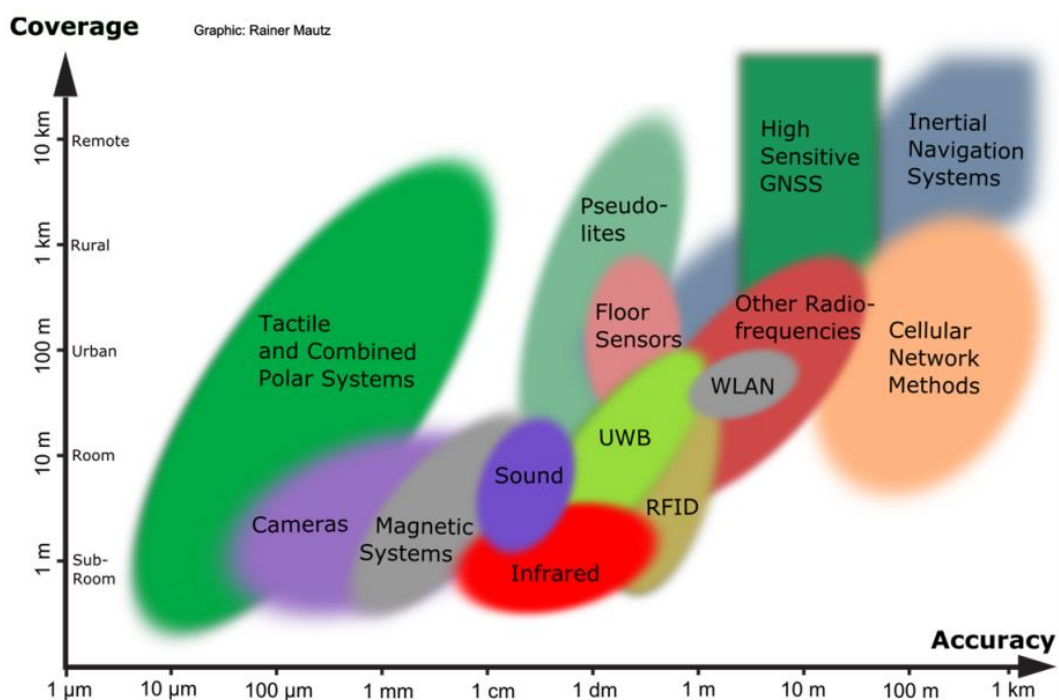


Рисунок 2 – Технологии локального позиционирования в зависимости от длины волн сигнала и зоны покрытия (Bluetooth входит в группу Other Radio-frequencies) [11]

Как уже было сказано ранее, измерение мощности сигнала избавлено от необходимости измерения времени, отправления временных меток и синхронизации узлов. Однако данный метод является также довольно чувствительным, если его использовать с Bluetooth. Мощность принимаемого сигнала помимо среды также очень сильно зависит от преград на пути распространения сигнала и от антенн излучателя и приёмников.

Исходя из исследований наилучшим пространством для определения позиции по Bluetooth является свободное от препятствий внутренне пространство зданий. Наличие статичных препятствий можно частично компенсировать поправочными коэффициентами. Движущиеся препятствия, например, человек или другие ИС, могут вносить большую ошибку оценки позиции.

Преимущество данного метода перед ToA и TDoA состоит в том, что сигналы, используемые для позиционирования, могут также использоваться для передачи данных. Bluetooth позволяет передавать небольшие данные с приемлемой скоростью. Для увеличения энергоэффективности при передаче данных используется технология BLE.

Для целей позиционирования на основе метода RSS компанией Apple был разработан протокол iBeacon. В режиме iBeacon Bluetooth модуль может передавать только необходимые для позиционирования данные. Маячки с настраиваемым интервалом работы совершают рассылку пакета данных, в который входит информация [12]:

- UUID (128 бит) – уникальный идентификатор, который определяет принадлежность маячков к определённой системе маячков или какому либо владельцу;
- Major (16 бит) – уровень идентификации маячков по группам объединённых общим UUID;
- Minor (16 бит) – последний уровень идентификации маячков по подгруппам, объединённых общими UUID и Major;

- «Measured Power» (8 бит) – уровень сигнала в одном метре от маячка, в дБм.

Чтобы избавиться от определения численно выраженного измерения расстояния между маячком и БС, было предложено использовать следующую классификацию:

- Immediate (<1 м) – маячок физически находится крайне близко к базовой станции или даже вплотную;
- Near (1-3 м) – маячок находится недалеко от базовой станции или ближе, если между ними имеются препятствия;
- Far (>3 м) – сигнал маячка всё ещё доступен базовой станции, но мощность сигнала ослабла слишком сильно из-за большого расстояния до БС или из-за препятствий;
- Unknown – расстояние до маячка не может быть установлено ввиду отсутствия сигнала или его значительного ослабления до уровня шума.

Данная классификация близости применима для систем, которые допускают большую ошибку в точности определения в несколько метров.

Повышение точности позиционирования по Bluetooth может быть достигнуто путём увеличения количества БС. Максимальное количество узлов определяется схемой подключения устройств и возможностями технологии Bluetooth.

1.2.2 Радиолокационные методы позиционирования

Рассмотрим радиолокационные методы, которые применимы к Bluetooth технологии. Пусть модель измерений положения описывается формулой

$$z = h(q) + \omega, \quad (2)$$

где $h(\cdot): \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}^m$ – функция измерений измерительного прибора;

$z \in \mathbb{R}^m$ – это вектор m измерений;

$\omega \in \mathbb{R}^m$ – это вектор ошибок измерительного прибора.

На основе данной модели измерений рассмотрим следующие методы.

1.2.2.1 Radio Signal Strength

Radio Signal Strength позволяет определить позицию ИС по измеренной мощности принятого сигнала. Этот метод является активным, вычисление положения ИС может быть как со стороны ИС, так и со стороны БС. БС должны быть статичны в пространстве, а их координаты – известны. Для двухмерной задачи требуется три базовые станции, для трёхмерной – четыре. Излучателем может быть как ИС, так и БС. Однако рассмотрим случай, когда излучателем является ИС.

Целевая станция испускает сигнал известной мощности P , который принимается базовыми станциями. Принятый i -ой базовой станцией сигнал имеет мощность P_i и определяется формулой передачи Фрииса [13]

$$P_i = \frac{c^2 G_{ri} G_t P}{(4\pi f)^2 L_i \rho_i^2}, \quad (3)$$

где P_i – мощность сигнала принимаемого i -ым БС, Вт;

c – скорость света, м/с;

f – частота сигнала, Гц;

G_{ri} – коэффициент усиления антенны i -го приёмника;

G_t – коэффициент усиления антенны излучателя;

P – мощность излучаемого сигнала, Вт;

$L_i \geq 1$ – коэффициент прочих потерь мощности сигнала, не связанных с распространением сигнала i -ого БС.

ρ_i – расстояние между излучателем и i -ым приёмником, м.

Благодаря известным значениям P и P_i , а также известным коэффициентам, можно вычислить расстояние ρ_i между искомой и i -ой базовой станциями, расположенными в свободном пространстве. Факторы, которые встречаются в реальном мире при распространении сигнала, такие как отражение сигнала от земли или атмосферы, дисперсия, подробно рассмотрены в [13].

Коэффициент усиления антенны характеризует способность антенны преобразовывать радиоволновое излучение в электрическую энергию и зависит от её геометрии и эффективности. Важно, что рассматриваемый вид формулы

предполагает, что антенны являются изотропными. Изотропная антенна является моделью антенны, которая излучает радиосигналы во все стороны с одинаковой интенсивностью. В действительности интенсивность излучения антенны неравномерна в пространстве.

Коэффициент прочих потерь мощности сигнала связан с потерями, не связанными с распространением сигнала. Например, затухания в линиях передач, потери в фильтрах и прочие. Если $L = 1$, то это значит, что в системе не наблюдается никаких потерь в оборудовании.

При вычислении мощности принимаемого сигнала в системах, для которых требуется большая точность и которые располагают большей информацией о конфигурации антенн и об окружающей среде, имеет смысл ознакомиться с расширенной формулой Фрииса, представленной в [14]. Для расчётов более простых систем, таких как системы локального позиционирования внутри зданий, может использоваться формула Фрииса в виде (4).

Главное, что позволяет определить формула (4), это то, что отношение мощности принимаемого сигнала к мощности испускаемого сигнала обратно пропорционально квадрату расстояния между принимающей и излучающей станциями. Тогда можно преобразовать формулу к упрощённому виду

$$P_i = k_i P \rho^{-a}, \quad (4)$$

где k_i – коэффициент передачи, зависящий от конфигурации антенн;

a – коэффициент потерь мощности сигнала при распространении в среде.

Эмпирически было выяснено, что коэффициент потерь мощности при распространении сигнала не всегда равняется двойке, как это представлено в формуле (4) для свободного пространства [13]. Значение a могут меняться, как представлено в таблице 2.

Таблица 2 – Коэффициент потерь мощности сигнала a при распространении в различных средах [13]

Среда	Коэффициент потерь мощности сигнала, a
Свободное пространство	2
Сотовая связь в городской среде	(2.7 - 3.5)
В здании без препятствий	(1.6 – 1.8)
В здании с препятствиями	(4 – 6)
На фабрике с препятствиями	(2 – 3)

Из прямых наблюдений было замечено, что шум имеет логнормальное распределение $\omega_i \sim \text{LogN}(0, \sigma_i^2)$. Логарифмируя выражение (5), получаем

$$\ln(P_i) = \ln(k_i) + \ln(P) - a \ln(\rho_i) + \omega_i; \quad (5)$$

$$\ln(P_i) - \ln(k_i) - \ln(P) = -a \ln(\rho_i) + \omega_i. \quad (6)$$

Таким образом измеренная сила сигнала \hat{P}_i , получаемая от i -ой БС, равна

$$\hat{P}_i = \ln(P_i) - \ln(k_i) - \ln(P). \quad (7)$$

Обращаясь к модели измерений (2), имеем $z_i = \hat{P}_i$, $\omega_i \sim \text{LogN}(0, \sigma_i^2)$, и функция измерения равна

$$h_i(q) = -a \ln \rho_i = -a \ln \sqrt{(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2} \quad (8)$$

$$z_i = -\frac{a}{2} \ln((x - x_i)^2 + (y - y_i)^2) + \omega_i; \quad (9)$$

Определив модель измерения (9) в соответствии с (2), можно выбрать метод, благодаря которому можно найти наилучший \hat{q} . Рассмотрим применение метода наименьших квадратов для линеаризованной задачи. Преобразуем уравнение (9) следующим образом

$$e^{-\frac{2}{a}z_i} = ((x - x_i)^2 + (y - y_i)^2) e^{-\frac{2}{a}\omega_i}. \quad (10)$$

Обозначим новую ошибку

$$\eta_i = e^{-\frac{2}{a}\omega_i} \quad (11)$$

Новая ошибка имеет математическое ожидание $E\{\eta_i\}$

$$E\{\eta_i\} = E\left\{e^{-\frac{2}{a}\omega_i}\right\} = e^{\frac{2\sigma_i^2}{a^2}}; \quad (12)$$

Как видно, мультипликативный шум η_i имеет смещение $E\{\eta_i\} = e^{\frac{2\sigma_i^2}{a^2}}$. Примем это во внимание и вычислим математическое ожидание выражения (10)

$$E\left\{e^{-\frac{2}{a}z_i}\right\} = \rho_i^2 E\{\eta_i\} = \rho_i^2 e^{\frac{2\sigma_i^2}{a^2}}. \quad (13)$$

Заметим, что если домножить обе стороны выражение (10) на $e^{-\frac{2\sigma_i^2}{a^2}}$, то получится

$$e^{-\frac{2}{a}z_i - \frac{2\sigma_i^2}{a^2}} = ((x - x_i)^2 + (y - y_i)^2) \cdot e^{-\frac{2}{a}\omega_i - \frac{2\sigma_i^2}{a^2}}; \quad (14)$$

$$E\left\{e^{-\frac{2}{a}z_i - \frac{2\sigma_i^2}{a^2}}\right\} = \rho_i^2. \quad (15)$$

То есть, используя косвенные измерения, было выведено измерение без смещения. Данное косвенное измерение можно использовать для дальнейшего вывода линеаризованной модели измерений, обозначив его как

$$\bar{z}_i = e^{-\frac{2}{a}z_i - \frac{2\sigma_i^2}{a^2}}. \quad (16)$$

Обозначив $r = x^2 + y^2$, и введя новую аддитивную ошибку $v_i \sim \mathcal{N}(0, \sigma_{v_i}^2)$, которая равна ошибке косвенных измерений запишем линеаризованное выражение

$$\bar{z}_i^2 - x_i^2 - y_i^2 = r - 2xx_i - 2yy_i + v_i. \quad (17)$$

Запишем все измерения в матричной форме

$$Z^* = H\theta + v, \quad (18)$$

где
$$Z^* = \begin{bmatrix} \bar{z}_1^2 - x_1^2 - y_1^2 \\ \bar{z}_2^2 - x_2^2 - y_2^2 \\ \vdots \\ \bar{z}_m^2 - x_m^2 - y_m^2 \end{bmatrix}, \quad \theta = \begin{bmatrix} x \\ y \\ r \end{bmatrix}, \quad H = \begin{bmatrix} -2x_1 & -2y_1 & 1 \\ -2x_2 & -2y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ -2x_m & -2y_m & 1 \end{bmatrix} \text{ и } v = \begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_m \end{bmatrix}$$

Таким образом, решение задачи наименьших квадратов с учётом, что $E\{v_i\} = 0$, выраженное через имеет вид

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\hat{\theta}} (Z^* - H\theta)^T (Z^* - H\theta) = (H^T H)^{-1} H^T Z^* \quad (19)$$

Также стоит заметить, что вычисленный вектор искомых координат $\hat{\theta}$ содержи \hat{q} и \hat{r} , которые взаимосвязаны. Так как $\hat{r} = \hat{q}^T \hat{q}$, то это условие должно быть применено при вычислении, что приводит к задаче наименьших квадратов

с дополнительным условием, решение которой может быть получено с помощью специального математического программного обеспечения. Если же такой вариант не доступен, можно избавиться от r , вычисляя $\bar{z}_i^2 - \bar{z}_j^2$, т.е.

$$\begin{aligned} \bar{z}_i^2 - \bar{z}_j^2 - x_i^2 + x_j^2 - y_i^2 + y_j^2 \\ = -2(x_i - x_j)x - 2(y_i - y_j)y + \eta_i - \eta_j. \end{aligned} \quad (20)$$

Для данной формулировки (20) задачи можно вывести матричное представление проблемы и решить её методом наименьших квадратов.

Также задачу можно решить с помощью метода взвешенных наименьших квадратов для нелинейных функций путём минимизации функции

$$J(\hat{q}) = \sum_{i=1}^m \frac{(\bar{z}_i - \sqrt{(\hat{x} - x_i)^2 + (\hat{y} - y_i)^2})^2}{\sigma_{v_i}^2}. \quad (21)$$

По сравнению с методами ToA и TDoA, метод RSS отличается тем, что:

- не требуется синхронизация узлов по времени;
- сигналы не содержат временных меток.

Однако данный метод подвержен тому, что:

- позиции БС должны быть известны;
- на результат измерений сильно влияет наличие преград между ИС и БС;
- необходимо измерять уровень мощности излучаемого сигнала;
- помимо наличия преград, окружающая среда, которая создаёт условия для отражения или рассеивания излучаемого сигнала, сильно влияет на качество измерений.

Помимо рассмотренных расчётов позиции для метода RSS существуют также эмпирически выведенные модели расчёта. Данные методы подробно описаны в книге [13]. В работе [15] для метода RSS описано влияние шумов, представлены различные эмпирические модели расчёта и поведения реальной системы в помещении на примере Wi-Fi.

В работе Signal Strength Difference on Arrival (SSDoA) – это метод позиционирования, основанный на измерении мощности сигнала, испущенного ИС и принятого разными БС. Является аналогом метода TDoA при измерении

затухания сигнала, а не времени распространения. Достоинством метода SSDoA является то, что не требуется измерять уровень мощности излучаемого сигнала. Недостатком – усложняющиеся расчёты при различных коэффициентах затухания для каждой БС. Дополнительную информацию по данному методу можно найти в работе [2].

Графически отобразить методы RSS и SSDoA можно изобразить так, как это представлено на рисунках 3 и 4. Для метода RSS графическое отображение — это пересечение окружностей, так как при составлении уравнений мы наблюдаем уравнение окружности. Для SSDoA – пересечение гипербол.

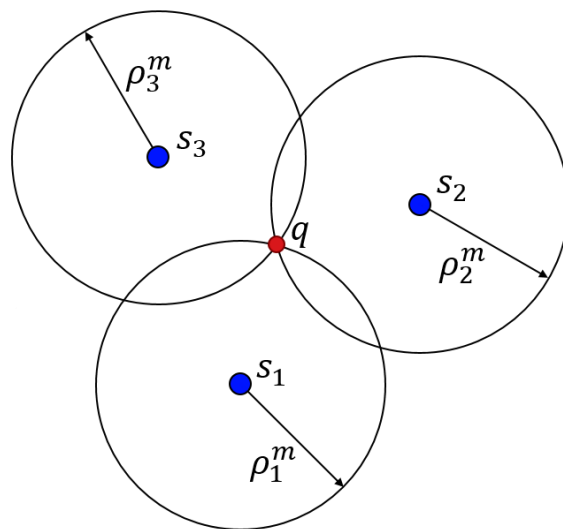


Рисунок 3 – Трилатерация методом RSS

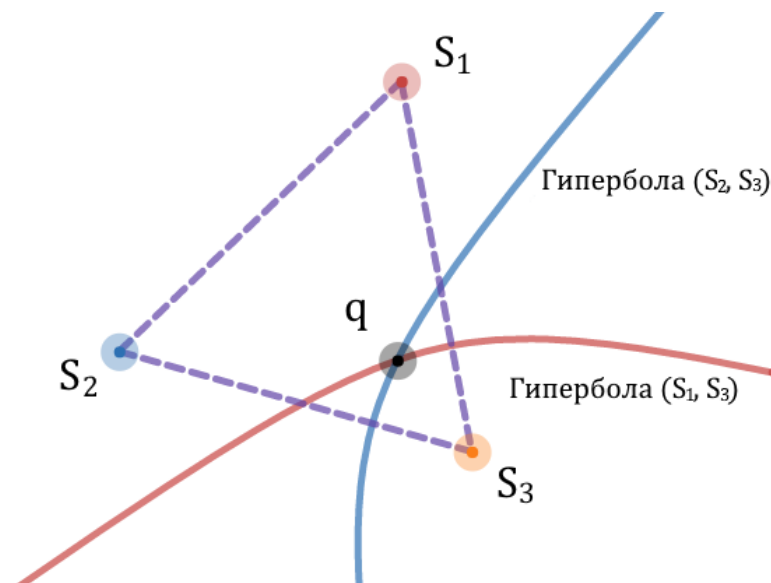


Рисунок 4 – Трилатерация методом SSDoA

1.2.2.2 Иные методы позиционирования

Time of Arrival (ToA) – это метод позиционирования, основанный на трилатерации, предполагающий измерение задержки распространения радиосигнала между ИС и БС. ТоА является активным методом позиционирования, а вычисление положения ИС может быть как со стороны самого ИС, так и со стороны БС. Опорные станции должны быть статичны в пространстве, а их координат – известны. Для плоской задачи требуется три базовые станции, а для пространственной – четыре.

Целевая станция испускает сигнал во время t , который принимается i -ой БС во время t_i . Тогда расстояние

$$\rho_i = (t_i - t)c, \quad (22)$$

где c – скорость света, равная $3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}}$. Из этого выражения следует, что БС и ИС должны быть синхронизированы по времени.

Другим методом позиционирования является Time Difference of Arrival. По известной классификации этот метод аналогичен ТоА. Расстояние между БС и ИС так же, как и в методе выше, определяется формулой (22). Но в данном методе считается, что время t неизвестно. Поэтому рассматривается разница расстояний, измеренных двумя станциями, i -ой и j -ой, $\forall i \neq j$. Это позволяет иметь ИС несинхронизированным.

Графическое представление методов ТоА и TDoA аналогично методам RSS и SSDoA, т.е. пересечения окружностей (рисунок 3) и пересечение гипербол (рисунок 4).

Недостатком данных методов является то, что измерение времени должно быть крайне точным. Это связано с тем, что скорость распространения сигнала, скорость света, крайне высока. Точность синхронизированных часов должна быть наносекундной. Так как использование высокоточных часов является дорогостоящей опцией, данный метод не лучший выбор для локального позиционирования по Bluetooth.

Ещё одним методом, основанным на распространении сигнала, является метод DoA (Direction of Arrival). DoA является методом позиционирования,

основанным на триангуляции, предполагающим измерение углов между базовыми ИС и БС. Для плоской задачи требуется две базовые станции, а для пространственного – три. Графическая интерпретация данного метода представлена на рисунке 5. Данный метод характеризуется более простыми вычислениями, а также он более устойчив к условиям отсутствия прямой видимости. Недостатком является то, что БС должна состоять из массива антенн.

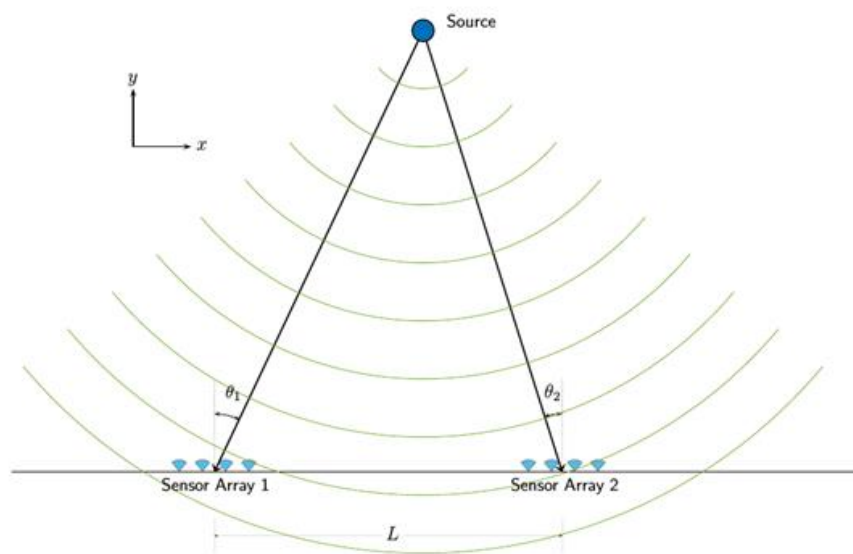


Рисунок 5 – Триангуляция методом DoA [17]

1.2.3 Прочие методы оценки позиции

В данной работе для всех описанных выше радиолокационных методов рассматривался единственный метод оценки позиции – метод наименьших квадратов для линеаризованной модели измерений с учётом ограничений на искомые переменные. Другие методы оценки искомых координат ИС также могут быть применены.

1.2.3.1 Метод роя частиц

Метод роя частиц – это численный итеративный метод, который не требует знания градиента функции, используемый для поиска минимума функции. Идея метода заключается в использовании множества точек, которые характеризуются положением q , скоростью Δq_i и коэффициентами c_{in} , c_{cog} и

c_{soc} . Точки располагаются в пространстве со случайными координатами q и случайной скоростью Δq_i . На k -ой итерации i -я частица обновляет своё положение и скорость согласно закону

$$\Delta q_i(k+1) = c_{in}\Delta q_i(k) + c_{cog}(r_i(k) - q(k)) + c_{soc}(g(k) - q(k)); \quad (23)$$

$$q_i(k+1) = q_i(k) + \Delta q_i(k+1); \quad (24)$$

где $k = (1, N)$ – шаг итерации;

N – число итераций;

$c_{in} \sim \mathcal{U}(c_{in}^{min}, c_{in}^{max})$ – инерционный коэффициент;

$c_{cog} \sim \mathcal{U}(c_{cog}^{min}, c_{cog}^{max})$ – коэффициент памяти частицы (когнитивный коэффициент);

$c_{soc} \sim \mathcal{U}(c_{soc}^{min}, c_{soc}^{max})$ – коэффициент памяти роя (социальный коэффициент);

$r_i(k)$ – вектор лучшего положения i -ой частицы к k -ой итерации;

$g(k)$ – вектор лучшего положения всего роя к k -ой итерации.

По мере исследования пространства частицы обновляют вектора $r_i(k)$ и $g(k)$. На k -ый момент итерации i -я частица записывает в качестве значения $r_i(k+1)$ из $q_i(k+1)$ и $r_i(k)$, при котором минимизируемая функция меньше. Аналогично частица поступает со значением $g(k+1)$, которое обновляется не отдельной частицей, а всем роем. То есть

$$r_i(k+1) = \begin{cases} q_i(k+1), & J(q_i(k+1)) \leq J(r_i(k)) \\ r_i(k), & J(q_i(k+1)) > J(r_i(k)) \end{cases}; \quad (25)$$

$$g(k+1) = \begin{cases} q_i(k+1), & J(q_i(k+1)) \leq J(g(k)) \\ g(k), & J(q_i(k+1)) > J(g(k)) \end{cases}; \quad (26)$$

Коэффициенты c_{in} , c_{cog} и c_{soc} позволяют настроить алгоритм для решения задачи минимизации. Выбор максимальных значений c_{in}^{max} , c_{cog}^{max} и c_{soc}^{max} и минимальных значений c_{in}^{min} , c_{cog}^{min} и c_{soc}^{min} для каждого из соответствующих коэффициентов определяет успешность и скорость поиска минимума исследуемой функции. Инерционный коэффициент c_{in} показывает, насколько частица будет стремиться исследовать новые области пространства.

Когнитивный коэффициент c_{cog} показывает, как сильно частица будет стремиться к найденному ею наилучшему состоянию на момент k -ой итерации. Социальный коэффициент c_{soc} показывает, как сильно частица будет стремиться к найденному всем роем наилучшему состоянию на момент k -ой итерации. Значения коэффициентов могут быть постоянными, а могут быть случайными. Также они могут быть одинаковыми для всего роя или специфичными для каждой отдельной частицы. Некоторые из возможных стратегий определения коэффициентов описаны в [18].

Количество итераций может быть ограничено установленным количеством, порогом прироста максимального значения $\varepsilon \geq |g(k+1) - g(k)|$ или другим условием.

Данный алгоритм имеет разновидности, которые позволяют повысить эффективность поиска. Одной из таких разновидностей является «алгоритм светлячков» (англ. Firefly alorithm). Данный алгоритм при обновлении скорости i -ой частицы учитывает позиции прочих частиц экспоненциальной зависимостью. Применение данного алгоритма, а также метода, комбинирующего метод наименьших взвешенных квадратов и «алгоритм светлячков», для решения задачи позиционирования методом TDoA можно рассмотреть в статье [19].

1.2.3.2 WCL

WCL (Weighted Centroid Localization) – метод расчёта позиции, основанный на вычислении центра масс. В качестве весов используется измеренные расстояния от искомой станции до базовых станций, возведённые в степень $(-a)$, где a – коэффициент затухания для имеющейся среды. Для N БС можно просто описать формулой

$$\hat{q} = \frac{\sum_{i=1}^N (\hat{\rho}_i^{-a} \cdot s_i)}{\sum_{i=1}^N \hat{\rho}_i^{-a}}. \quad (27)$$

Для данного метода всегда будет присутствовать ошибка ввиду того, что данный метод осуществляет поиск взвешенного центра.

Метод WCL может быть заменён методом REWL (Relative span weighted localization), который аналогичен WCL за отличием того, что для расчёта весов используется мощность сигнала, что позволяет исключить вычисление расстояния, а также того, что для расчётов требуется максимальное значение мощности принимаемого сигнала каждой из БС. Оба метода подробно освещены в работе [20]. В работе анализируется точность позиционирования методом RSS с оценкой координат методами WCL и REWL.

1.2.3.3 Fingerprinting

Fingerprinting (англ. отпечаток пальца) – концепция определения позиции на основе предварительно подготовленной базы данных, из записей взаимного соответствия $\{(\mathbf{P}_1, q_1), \dots, (\mathbf{P}_N, q_N)\}$, где $\mathbf{P}_i \in \mathbb{R}^m$ – вектор мощностей с каждой из БС, m – количество БС, N – размер базы данных.

Для реализации данной идеи существует множество методов. Исследование применения обучения с учителем для позиционирования по Bluetooth было представлено в работе [21]. Авторы провели измерения мощности сигнала в разных частях экспериментальной зоны и по ним обучили несколько различных моделей с помощью линейных, нелинейных методов и ансамблей методов. Среди них наилучшими оказались модели, полученные из ансамблей методов. Худшая точность была у линейных моделей. Наилучший результат показала модель метода градиентного бустинга (GBM). Также в работе указаны потребление энергии, количество инструкций за такт и процент использования ЦП для каждой модели.

1.2.3.4 Другие методы оценки позиции

Наиболее логичным продолжение метода наименьших квадратов является применение метода наименьших взвешенных квадратов. Тогда минимизируемая функция будет иметь вид

$$J(\hat{q}) = (\mathbf{Z} - \mathbf{H}\hat{\theta})^T \mathbf{W}(\mathbf{Z} - \mathbf{H}\hat{\theta}), \quad (28)$$

а решение задачи будет иметь вид

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\hat{\theta}} (Z - H\hat{\theta})^T W (Z - H\hat{\theta}) = (H^T W H)^{-1} H^T W Z. \quad (29)$$

В таком случае вводится весовая матрица W , которая позволяет учитывать достоверность информации собранных измерений. Для определения весов можно использовать матрицу ковариаций проводимых измерений. Если считать, что все измерения независимы, то матрица весов будет иметь вид

$$W = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sigma_1^2} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_2^2} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & \frac{1}{\sigma_m^2} \end{bmatrix}. \quad (30)$$

Стоит учитывать, что, например, для методов TDoA и ToA дисперсия зависит от положения ИС, что не позволяет однозначно определить весовую матрицу.

Сегодня большой популярностью пользуется искусственный интеллект, который благодаря своей гибкости, может быть использован для оценки позиции ИС. Примеры использования таких технологий для позиционирования могут быть найдены в [22] и [23].

При рассмотрении методов TDoA и SSDoA было показано, что графической интерпретацией данных методов является гипербола. Для таких методов был разработан эффективный метод оценки позиции – метод Чана и Хо. Метод является более надёжным по отношению к двойственному результату. Метод разработан для ближней и дальней дистанции, а также может использовать m ОС. Данный метод описан в [24], а его применение можно наблюдать в [2].

1.2.4 Фильтрация измерений

Измерение координат с помощью Bluetooth при использовании любого метода, будь то измерение времени распространения сигнала или изменение мощности сигнала, является довольно ненадёжным методом, так как ошибка

зачастую составляет несколько метров даже на небольших территориях. Это происходит ввиду воздействия внешних сил на ИС и БС, а также сигналы, посылаемые от одной станции другой. В системе позиционирования по Bluetooth это выражается в двух видах: в зашумлении сигнала и в шуме процесса измерения. Во-первых, так как сигнал распространяется в среде, на него воздействуют окружающие пространство, которые его искажают. Сигнал теряет свою мощность при прохождении в среде. Во-вторых, шум процесса измерения обусловлен тем, что само измеряющее устройство влияет окружающая среда. Также антенны БС и ИС измеряют мощность сигнала дискретными устройствами, при том, что сам сигнал является величиной аналоговой, что создаёт ошибку измерения.

В системе позиционирования есть две величины, которые можно фильтровать: измерения БС и рассчитанные координаты. Допустим, что за время t было получено N измерений, которые, очевидно, подвержены шумовому воздействию. Желаемый результат фильтрации таких измерений должен. Допустим, что за время t было получено N измерений, которые, очевидно, подвержены шумовому воздействию. Желаемый результат должен исключать все грубые погрешности и быть сглаженным. Отсюда следует, что для фильтрации необходимо применять фильтр или каскад фильтров, который борется с грубыми измерениями и с высокочастотным шумом.

Обозначим фильтруемые данные как $Z \in \mathbb{R}^N$, где N – количество измерений. На фильтрацию подаётся массив данных Z , измеренный за время t , а также дополнительные параметры фильтра. На выходе фильтра мы должны иметь массив $Z^* \in \mathbb{R}^N$.

Рассмотрим некоторые фильтра, которые могут быть применены в системе позиционирования.

1.2.4.1 Фильтр скользящего среднего

Для непосредственного сглаживания данных применяются различные фильтры, а самым простым из них является фильтр среднего скользящего.

Данный фильтр часто является наиболее оптимальным решением для удаления шума без большого искажения данных [25].

Идея фильтра заключается в вычислении среднего значения близстоящих точек для каждого значения массива данных Z^* . То есть для каждого Z_i^* выбирается окно размером $S = 2L + 1$ вида $(Z_{i-L}, Z_{i-L+1}, \dots, Z_i, \dots, Z_{i+L})$, для которого вычисляется среднее значение \bar{Z}_i^* , которое вычисляется как

$$Z_i^* = \frac{1}{S} \sum_{j=0}^{2L} Z_{i-L+j}. \quad (31)$$

Стоит отметить, что для размер окна был выбран равным нечётному числу $2L + 1$ нечётным специально, т.к. это позволяет вычислять среднее значение легко и эффективно. Размер окна может быть чётным, однако для этого придётся применять центрирование, при котором вычисляется средняя из двух соседних окон чётного размера.

Также данный фильтр может иметь вид

$$Z_i^* = \frac{1}{S} \sum_{j=0}^{S-1} Z_{i-j}. \quad (32)$$

В этом случае размер окна S может быть задан произвольно. Тогда массив входных данных имеет вид $(Z_{i-S}, \dots, Z_{i-1}, Z_i)$. Для i -го значения помимо самого этого значения учитываются не соседние элементы по L слева и справа, а S предыдущих элементов.

Для данного фильтра актуальна проблема неоднозначности обработки данных при недостатке данных по краям окна, которую можно решить добавлением нулей вместо недостающих значений, многократным дублированием последнего значения или сужением окна.

Расширить возможности предыдущего фильтра использованием весов при вычислении суммы позволяет фильтр взвешенного скользящего среднего. Для формулы (31) такой фильтр имеет вид

$$Z_i^* = \frac{1}{S} \sum_{j=0}^{2L} b_j \cdot Z_{i-L+j}, \quad (33)$$

где b_j – вес j -го элемента суммы.

Или для формулы (32) –

$$Z_i^* = \frac{1}{S} \sum_{j=0}^{S-1} b_j \cdot Z_{i-j}. \quad (34)$$

Необходимо учитывать, что веса должны быть нормированными, т.е. соответствовать соотношению

$$\sum_j b_j = S. \quad (35)$$

Веса выбираются из соображения наилучшей производительности фильтра. Максимальный вес может быть отдан значению, около которого находится среднее, или самому старому или самому новому значению.

1.2.4.2 Адаптивная скользящая средняя Кауфмана

Рассматриваемый метод адаптивной скользящей средней разработан для анализа рынка трейдерами [26]. Для обработки сигналов также можно использовать данный алгоритм. Этот метод основывается на методе экспоненциального взвешенного скользящего среднего. Для настройки используются три коэффициента:

- n – количество элементов для вычисления среднего;
- f – количество элементов для вычисления быстрого коэффициента сглаживания;
- S – количество элементов для вычисления медленного коэффициента сглаживания.

В оригинальной работе создателя данного метода предлагаются коэффициенты $n = 10$, $f = 2$, $s = 30$. Однако более предпочтительно исследование собственных коэффициентов для целей позиционирования.

Вычисления начинаются с вычисления общего движения значений (direction) d и шумовых движений (volatility) v , которые позволяют получить коэффициент эффективности (Efficiency Ratio, ER).

$$d_i = |Z_i^* - Z_{i-n-1}^*|, \quad (36)$$

$$v_i = \sum_{j=0}^{n-2} |Z_{i-j}^* - Z_{i-j+1}^*|, \quad (37)$$

$$ER_i = \frac{d_i}{v_i}. \quad (38)$$

Следующим шагом необходимо вычислить сглаживающую константу α_i . Для этого также находятся коэффициент быстрой скользящей средней F и коэффициент медленной скользящей средней S .

$$F = \frac{2}{f+1}; \quad (39)$$

$$S = \frac{2}{s+1}; \quad (40)$$

$$\alpha_i = (ER_i \cdot (F - S) + S)^2. \quad (41)$$

Итоговая формула для вычисления скользящей средней имеет вид:

$$Z_i^* = \alpha Z_{i-j} + (1 - \alpha) Z_{i-1}^*. \quad (42)$$

1.2.4.3 Медианный фильтр

Медианный фильтр является типичным примером робастного фильтра и служит для фильтрации аномальных выбросов. Медианный фильтр аналогичен скользящему среднему, однако вместо среднего значения в нём используется медиана. Ширина рассматриваемого окна $S = 2L + 1$. Выглядит формула следующим образом.

$$Z_i^* = \text{median}(Z_{i-L}, Z_{i-L+1}, \dots, Z_i, \dots, Z_{i+L}). \quad (43)$$

Также медианный фильтр может иметь форму наподобие (32), которая выглядит как

$$Z_i^* = \text{median}(Z_{i-S}, \dots, Z_{i-1}, Z_i), \quad (44)$$

Данный фильтр характеризуется тем, что неплохо сглаживает основную линию, не меняет форму пиков на склонах и эффективно устраняет отдельные выбросы, заменяя их на медиану. Учитывая, что при позиционировании невозможно мгновенное перемещение ИС в пространстве, данный фильтр менее применим в сглаживании данных по сравнению с прочими фильтрами.

Однако данный фильтр может использоваться для устранения грубых измерений, вызванных некоторыми сторонними воздействиями. В области обработки изображений данный фильтр находит применение в удалении шума «соль и перец» и импульсных шумов [27]. Для увеличения скорости работы фильтра можно рассмотреть быстрый алгоритм медианного фильтра, предложенный в [28].

1.2.4.4 Фильтр Калмана

Фильтр Калмана учитывает несколько источников информации: модель движения ИС в пространстве и результаты измерения позиции методами радиолокационного позиционирования.

Предположим, что мы имеем систему, состоящую из модели движения ИС и модели измерения позиции ИС системой позиционирования, имеющую вид

$$\begin{cases} x(t+1) = A(t)x(t) + B(t)u(t) + G(t)v(t) \\ z(t) = H(t)x(t) + \varepsilon(t) \end{cases}, \quad (45)$$

где $x(t)$ – вектор состояний;
 $u(t)$ – управляющее воздействие;
 $v(t)$ – возмущающие воздействия;
 $A(t)$ – матрица состояний;
 $B(t)$ – матрица управления;
 $G(t)$ – матрица возмущений;
 $z(t)$ – вектор измерений;
 $H(t)$ – матрица измерения;
 $\varepsilon(t)$ – ошибка измерения.

Вектор состояний $x(t)$ зависит от избранной модели движения ИС. В минимальном составе он представляет собой координаты положения ИС и его скорость по каждой координате, т.е.

$$x(t) = [q \quad \dot{q}]^T = [x \quad y \quad \dot{x} \quad \dot{y}]^T. \quad (46)$$

Также в зависимости от модели движения выбираются $A(t)$, $B(t)$, $G(t)$, $u(t)$, $v(t)$. Модель измерений, т.е. $H(t)$ и $\varepsilon(t)$, определяются согласно выбранному методу позиционирования.

Для фильтра Калмана важно иметь представление о возмущающих воздействиях модели движения и о случайном воздействии на проводимые измерения. Поэтому будем считать, $v(t)$ и $\varepsilon(t)$ представляют собой белый шум, и примем, что математическое ожидание $E\{v(t)\} = E\{\varepsilon(t)\} = 0$, а матрицы ковариаций $Cov\{v(t)\} = Q(t)$ и $Cov\{\varepsilon(t)\} = R(t)$.

Фильтр Калмана предлагает двухэтапную фильтрацию вектора состояний. На первом этапе вектор состояния экстраполируется согласно модели движения (47). А также вычисляется матрица ковариаций для экстраполированного значения (48). На втором этапе данные значения обновляются с учётом измерения позиции ИС системой позиционирования, применяя метод наименьших взвешенных квадратов. Вычисляется оптимальный коэффициент Калмана (50), который позволяет получить скорректированный вектор состояния (51). На основе того же коэффициента обновляется матрица ковариаций вектора состояния (52).

Этап предсказания:

$$\hat{x}^-(t+1) = A(t)x(t) + B(t)u(t); \quad (47)$$

$$P^-(t+1) = A(t)P(t)A(t)^T + G(t)Q(t)G(t)^T. \quad (48)$$

Этап коррекции:

$$S(t+1) = H(t+1)P^-(t+1)H(t+1)^T + R(t+1); \quad (49)$$

$$K(t+1) = P^-(t+1)H(t+1)^T S(t+1)^{-1}; \quad (50)$$

$$\hat{x}(t+1) = \hat{x}^-(t+1) + K(t+1)(z(t+1) - H(t+1)\hat{x}^-(t+1)); \quad (51)$$

$$P(t+1) = (I - K(t+1)H(t+1))P^-(t+1). \quad (52)$$

Из приведённого ниже алгоритма видно, что необходимо иметь представление о положении ИС и о матрицы ковариации в нулевой момент времени. Предположим, что в начальный момент времени нам известно состояние ИС априори ($x(0) = x_0$, $P(0) = 0$) или исходя из первых измерений системы позиционирования $x(0) = [z(0) \quad \dot{z}(0)]^T$ ($x(0) = x_0$, $P(0) = G(0)Q(0)G(0)^T$).

Для системы позиционирования, которая не обладают знанием о модели движения ИС, данная информация не учитывается. Учтём также, что $Z_i \in \mathbb{R}$. Тогда $x(i) = Z_i$, $A(i) = 1$, $B(i) = 0$, $H(i) = 1$, $G(i) = 1$.

Инициализация дисперсии $P(0) = P_0$ может проводиться по-разному. Имеет начинать с $P_0 = 0$, если первое значение исходного массива данных не вызывает сомнения. Если же первый элемент Z^* не вызывает доверия, то стоит выбирать достаточно большое P_0 либо $P_0 = Q(0) = Q_0$.

Если учесть все предыдущие замечания, а также сделать небольшие преобразования в формулах, то итоговый фильтр для массива значений Z_i будет описываться как

$$Z_i^* = \begin{cases} Z_0, & i = 0 \\ K_i \cdot Z_i + (1 - K_i)Z_i^*, & i > 0 \end{cases} \quad (53)$$

$$K_i = P_i(P_i + R_i)^{-1}; \quad (54)$$

$$P_i = \begin{cases} P_0, & i = 0 \\ (1 - K_{i-1})P_{i-1} + Q_{i-1}, & i > 0 \end{cases} \quad (55)$$

где Z_i^* – выходное значение фильтра для i -го значения исходного массива данных;

$K_i = K(i)$ – оптимальный коэффициент усиления для i -го значения;

P_i – дисперсия для экстраполируемого значения согласно принятой модели для i -го значения;

Q_i – дисперсия шума принятой модели для i -го значения;

$R_i = R(i)$ – дисперсия ошибки измерений для i -го значения.

Фильтр Калмана использует последнее по времени значение, т.е. отсутствует запаздывание сигнала. Для фильтрации нового значения

используется только предыдущие значения. Данный фильтр представляет собой разновидность экспоненциального сглаживания, если коэффициенты не зависят от времени (т.е. от i).

Применение данного фильтра и сравнение его с другими представлено в работе [29].

2 Проектирование системы локального позиционирования

Как указано в задании к данной работе, при разработке программно-аппаратного обеспечения локального позиционирования должны использоваться следующая лабораторная база:

- микроконтроллеры ESP32, 5 штук;
- компьютер, обладающий ОЗУ объёмом не менее 4 ГБ и не менее одним разъёмом USB Type A.

Выделим следующие задачи:

- разработать структурную схему;
- выбрать элементы системы;
- определить программную архитектуру системы;
- разработать функциональную схему.

2.1 Разработка структурной схемы системы

Рассмотрим архитектуру системы позиционирования, используемую в работах [29], [30] и [31]. Данная архитектура изображена на рисунке 6. Мобильное устройство (телефон), выполняющее роль искомой станции, принимает сигналы, рассылаемые БС. Мобильное устройство отправляет на сервер RSSI базовых станций для расчёта позиции. Сервер возвращает обратившемуся мобильному устройству его рассчитанные координаты.



Рисунок 6 – Архитектура системы локального позиционирования, описанная в [29], [30] и [31]

Ввиду выноса расчёта позиции на сервер представляется возможным осуществлять дополнительные действия, связанные со обработкой данных, отсылаемых мобильным устройством. Связь между мобильным устройством и сервером может осуществляться по любому доступному многопользовательскому высокоскоростному каналу связи, например, Wi-Fi. Данная архитектура является наиболее выгодной для пользователей мобильных устройств и владельца системы позиционирования, так как она масштабируется с минимальными правками в программном коде или сети маячков, устойчива к выходу из строя БС, а также использует простое и узкоспециализированное программное обеспечение. Минусом данной системы является то, что если БС, ИС и сервер являются различными платформами, то для разработки программного обеспечения привлекаются специалисты как минимум трёх различных направлений.

Другим вариантом является система, где мобильное устройство является маячком и рассылает сигналы, принимаемые БС (рисунок 7). Эта архитектура обладает заметными недостатками по сравнению с предыдущим вариантом. Для создания обратной связи от сервера к мобильному устройству, необходимо устанавливать несколько подключений: к БС и серверу. Поэтому применять данную архитектуру для мобильных устройств в виде смартфона или подобных ему устройств не рекомендуется. Если БС не обладает многопользовательским высокоскоростным каналом связи, то подключение множества БС по Bluetooth или проводному каналу затруднительно. Чтобы снизить количество подключений можно использовать модификацию, представленную на рисунке 8.

Архитектура на рисунке 8 использует возможность сообщения БС между собой по Bluetooth. Применение топологии дерево является не совершенным решением, так как при превышении лимита подключённых по Bluetooth устройств, расширение системы БС будет возможно только за счёт применения промежуточных маячков, т.е. увеличения длины дерева, или использования ячеистой топологии, что заметно усложняет программное обеспечение на стороне БС. Плюсом данной системы является упрощение программного

обеспечения мобильного устройства, а также снижение требований к самому мобильному устройству.

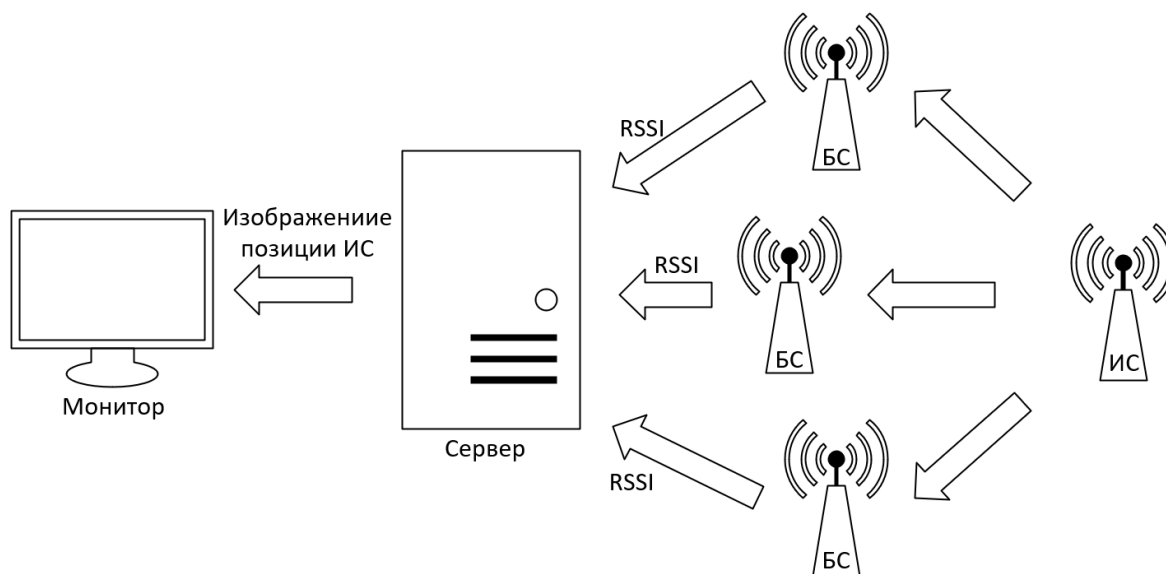


Рисунок 7 – Архитектура системы локального позиционирования одностороннего действия

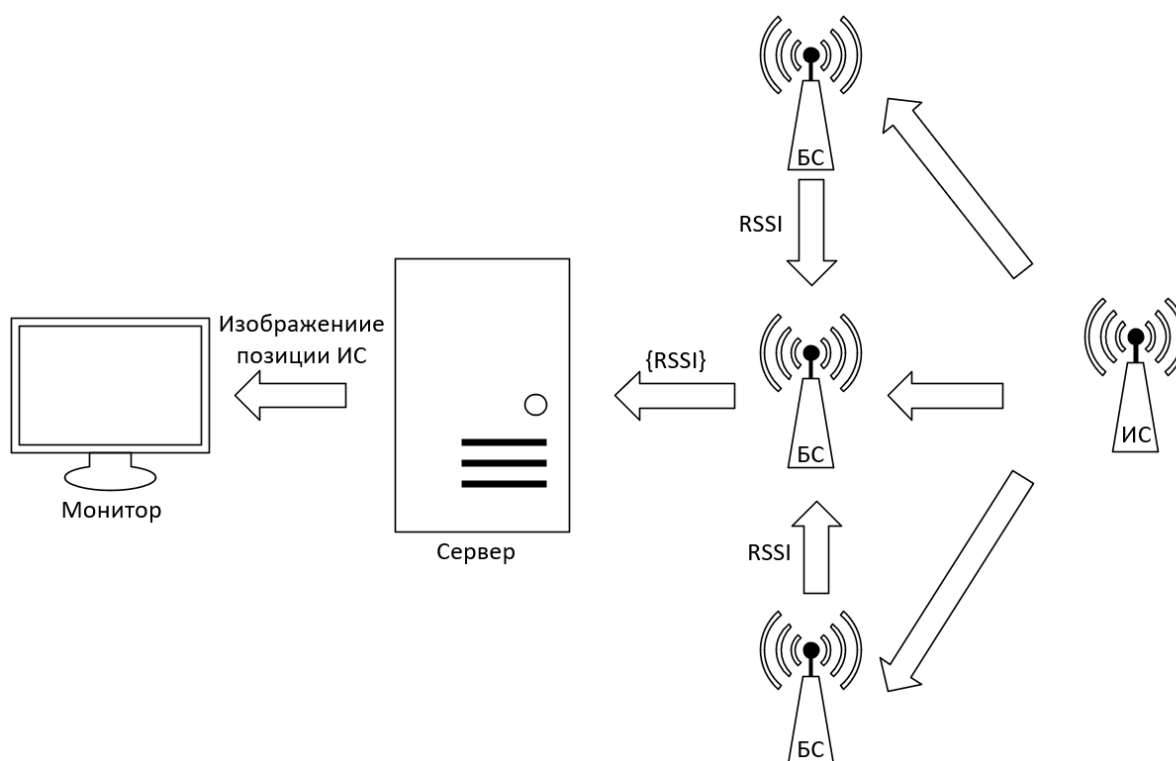


Рисунок 8 – Архитектура системы локального позиционирования одностороннего действия с одним каналом связи с сервером

Так как на текущий момент не наблюдается возможность использования более сложной искомой станции и создания программного обеспечения для такой станции, то остановимся на архитектуре системы локального позиционирования одностороннего действия с одним каналом связи с сервером.

Так как ИС может перемещаться в пространстве, а БС – статично, то ИС необходимо обеспечить автономным источником питания. Для БС можно организовать единую сеть питания, например, от компьютера.

Для проектирования программной составляющей сервера снова обратимся к работе [30]. В данной работе авторы предлагают следующий алгоритм поиска расстояния между БС и ИС через измеренные мощности принятых сигналов. Рассмотрим модифицированный алгоритм с включением фильтров для RSSI и последующей оценкой позиции (рисунок 9).

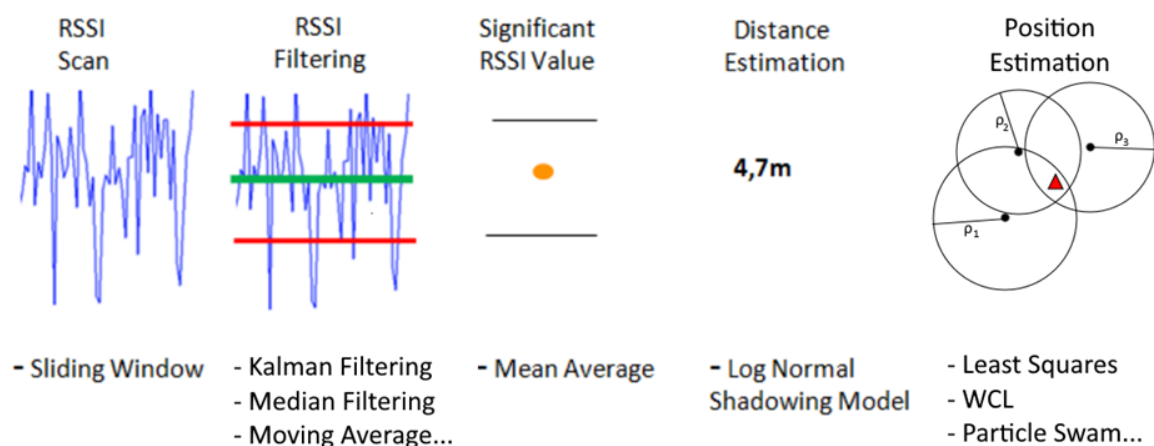


Рисунок 9 – Алгоритм оценки позиции на основе [30]

1. Первым шагом является сбор RSSI в течении некоторого времени с помощью Bluetooth связи между ИС и БС. Результатом первого шага является несколько массивов RSSI от каждой из БС.

2. Вторым шагом является фильтрация каждого массива. Для этого можно использовать фильтры, предложенные в работе [30] или в главе 1.2.4 данной ВКР. На выходе данного шага мы имеем массивы фильтрованных значений RSSI тех же размеров, что и входные массивы.

3. Третий шаг – сведение всех массивов в единственные значения. Для достижения этого можно использовать среднее арифметическое.

4. На четвёртом шаге полученные для каждого БС значения RSSI преобразуются в расстояние с помощью формулы Фрииса, записанной в форме (4).

5. Последним шагом является преобразования массива расстояний между БС и ИС в координаты ИС. На выходе данного алгоритма мы имеем рассчитанные для измеренных значений RSSI координаты ИС. Дополнительно в данный алгоритм можно включить фильтр координат, так как первичной фильтрации может быть недостаточно.

По выбранной архитектуре системы локального позиционирования и по выбранному алгоритму расчёта позиции составим структурную схему всей разрабатываемой системы (рисунок 10). На изображённой структурной схеме используются следующие обозначения:

БС М – корневая базовая станция, которая измеряет RSSI от ИС, а также собирает измеренные другими БС RSSI и отправляет их на вычисляющий сервер;

БС 0 – N – базовые станции, которые собирают измеряют RSSI от ИС и отправляют их на главную корневую станцию, где N – количество таких станций;

Маячок – устройство, рассылающее пакеты данных через BLE базовым станциям;

Распределитель – часть вычисляющей программы, которая распределяет RSSI по соответствующим БС веткам вычисления расстояния $\hat{\rho}$;

Z_i – RSSI, измеренное i -ой БС;

T_n – время начала измерений на БС М;

T_k – время конца измерений на БС М;

$\{Z\}$ – массив RSSI, записанных в БС М в промежутке от T_n до T_k ;

$\{Z_i\}$ – массив RSSI, измеренных i -ой БС в промежутке от T_n до T_k ;

$\{Z_i^\phi\}$ – массив отфильтрованных RSSI, измеренных i -ой БС;

\bar{Z}_i – арифметическое среднее массива отфильтрованных RSSI i -ой БС;

$\hat{\rho}_i$ – измеренное расстояние между i -ой БС и ИС;

$\{\hat{\rho}_i\}$ – массив измеренных расстояний между всеми БС и ИС;

\hat{q} – координаты ИС;

\hat{q}^Φ – отфильтрованные координаты ИС;

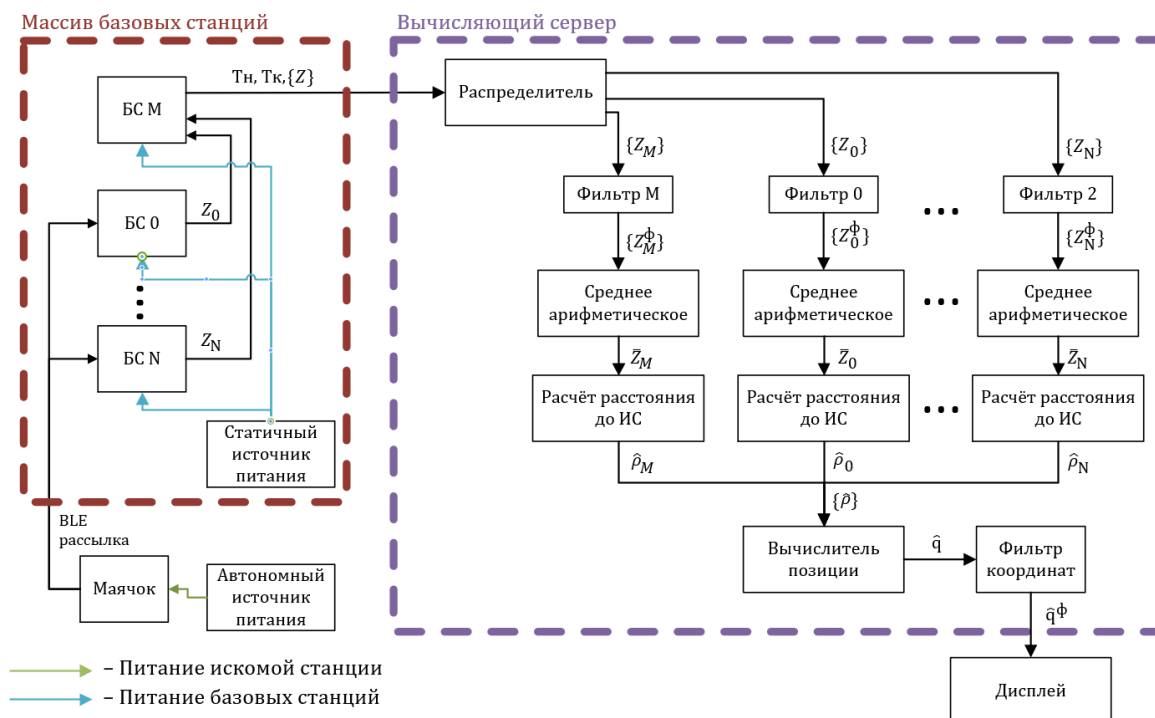


Рисунок 10 – Структурная схема системы локального позиционирования по BLE

Структурная схема составлена в точности с алгоритмом, приведённом выше. Питание БС происходит от единого источника питания, который может быть в виде аккумулятора или в виде сети электроснабжения с адаптером питания. Так как в роли ИС может выступать человек то, питание маячка происходит от автономного источника питания, например, от аккумулятора. По Bluetooth массив измерений, проведённых базовыми станциями, передаётся на распределитель, который задаёт верный вектор измерений, так как для каждой пары ИС-БС необходимы отдельные сущности фильтров и вычислителей позиции, так как они обладают памятью, которая участвует при обработке новых порций данных. Далее измерения проходят через фильтры, усреднение и преобразуются в расстояния от ИС до соответствующей БС. Полученные расстояния преобразуются в координаты ИС, которые затем дополнительно фильтруются. Координаты ИС на выходе вычислительного сервера передаются на показывающий их дисплей.

2.2 Выбор элементов системы

Произведём выбор элементов, приведённых на структурной схеме. Для каждого элемента рассмотрим характеристики изделия и оценим его пригодность для разрабатываемой системы, на основе чего сделаем выбор в пользу или против этого элемента.

2.2.1 Выбор базовых и искомой станций

Исходя из задания к данной выпускной квалификационной работе в качестве базовых станций и искомой станции используем микроконтроллеры ESP32. Существенные технические характеристики данного контроллера представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Технические характеристики ESP32 WROOM DevKit v1 [32]

Характеристика	Значение
Протоколы беспроводной связи	Wi-Fi, BLE v4.2
Оперативная память SRAM	520 КБ
Аппаратные интерфейсы:	3× SPI, 3× UART, 2× I ² C, 2× I ² S
Напряжение логических уровней	3.3 В
Входное напряжение через пин Vin	(5–14) В
Антенна	На плате
USB порты	1× microUSB

Как видно из таблицы 3, ESP32 оснащён встроенной антенной и поддерживает технологию BLE, что позволяет без дополнительного обеспечения использовать микроконтроллер для связи по BLE. Расположение антенны на плате плохо сказывается на её эффективности.

Программирование микроконтроллера осуществляется на языке C++ с помощью платформы Arduino для ESP32 и IDE Visual Studio Code с плагином Platform IO. Ядро Arduino для ESP32 содержит компоненты для работы с Bluetooth LE, что упрощает разработку.

На текущий момент в наличии имеются 5 микроконтроллеров ESP32. Для системы позиционирования на плоскости необходимо использовать как

минимум три БС. Выберем один микроконтроллер в качестве ИС, а остальные четыре – в качестве БС.

2.2.2 Выбор сервера и монитора

Как было сказано ранее, в разработке системы локального позиционирования необходимо использовать компьютер, который будет участвовать в качестве сервера. Рассмотрим два варианта: персональный компьютер (ПК) и ноутбук. В качестве выбора имеется ПК, размещённый в аудитории 101 корпуса №10 ТПУ, и личный ноутбук Acer Nitro. Так как оба устройства находятся в текущей доступности, их цена на решение не влияет. Сравнение представлено в таблице 4.

Таблица 4 – Сравнение инструментов для разработки ПО для ПК

Параметр	Инструмент	
	ПК	Ноутбук
Скорость работы	+	-
Количество USB-портов Type-A	6	3
Время доступности	-	+
Переносимость	-	+

ПК в 101 аудитории обладает лучшим оснащением и большим количеством необходимых USB-портов. Однако так как условия разработки могут меняться ввиду непредвиденных обстоятельств, то более важным параметром является время доступности. Поэтому в качестве сервера выберем ноутбук.

Ноутбук имеет встроенный дисплей, который будет использован как монитор для вывода данных.

2.2.3 Выбор инструментов разработки ПО для сервера

Для разработки программного обеспечения для настольных компьютеров существует множество различных средств. Рассмотрим и сравним некоторые крупные современные проекты для разработки ПО (таблица 5).

Таблица 5 – Сравнение инструментов для разработки ПО для ПК

Параметр	Инструмент			
	.NET, C#	JVM, Java	C++	CPython, Python
Кроссплатформенная среда выполнения	+	+	-	+
Простота/скорость разработки	+	+	-	+
Скорость выполнения программы	+	+	+	-
Опыт работы	-	+	-	-

Как видно из следующей таблицы лучше всего для текущей разработки серверного ПО подходит виртуальная машина Java и её язык программирования Java. Для данного инструмента произведём подборку IDE и библиотек для создания графического интерфейса. Составим сравнительную таблицу доступных IDE (таблица 6).

Таблица 6 – Сравнение IDE для Java [33]

Параметр	IDE		
	IntelliJ Idea	Eclipse	NetBeans
Эффективность рефакторинга	+	+	-
Скорость автозавершения	+	-	-
Поддержка Git	+	+	+
Поддержка плагинов	+	+	-
Популярность в России [34]	+	+/-	-
Цена	+/-	+	+
Скорость автозавершения	+	-	-

По произведённому сравнению легко сделать выбор IDE в пользу IDE IntelliJ Idea. Эта IDE наиболее удобна для разработки небольших приложений, обладающая большим функционалом, позволяя максимизировать скорость разработки, являясь при этом бесплатным программным обеспечением (IntelliJ IDEA Community Edition).

Далее необходимо выбрать библиотеку, с помощью которой можно будет создавать графический интерфейс пользователя. Подборка известных библиотек и их сравнение представлен в таблице 7.

Таблица 7 – Сравнение библиотек GUI для Java [35]

Параметр	Библиотека		
	AWT	Swing	JavaFX
Отрисовка элементов	-	+	+
Производительность	+	-	-
Декларативный UI	-	+/-	+
Количество компонентов	-	+	-
Применимость	Небольшие программы	Небольшие программы	Крупные программы
Опыт работы	-	+	-

Исходя из сравнения в таблице 7 останавливаем выбор на библиотеке Swing, так как данная библиотека подходит для разработки небольших программ, а при использовании IDE IntelliJ Idea можно использовать встроенный создатель форм, что упрощает разработку графического интерфейса.

Среди прочих инструментов отметим следующие библиотеки. Для отображения графиков используем свободно распространяемую библиотеку многофункциональную библиотеку XChart, с помощью которой можно создавать двумерные графики, круговые диаграммы и другие виды графиков [36]. Для подключения к ESP32 по USB будем использовать легковесную библиотеку jSerialComm, готовую к использованию на всех популярных операционных системах [37].

2.2.4 Выбор шаблона проектирования архитектуры ПО

На текущий момент при разработке программного обеспечения используются некоторые популярные архитектуры: MVC, MVP, MVVM. Рассмотрим характеристики данных решений и выберем наиболее подходящее (таблица 8).

Таблица 8 – Сравнение шаблонов проектирования архитектуры приложений [38]

Параметр	Библиотека		
	MVC	MVP	MVVM
Количество кода	+	-	+/-
Разделение ответственностей	-	+	+
Зависимости	-	-	+
Масштабируемость	-	+	+
Размеры проектов	Малые	Средние, крупные	Малые, средние, большие
Примеры использования	iOS, Ruby on Rails	Widows Forms	Android, WPF, AngularJS

В данном случае наиболее подходящим шаблоном проектирования вышел MVVM. Учитывая, что планируемое приложение будет иметь малое количество окон, то использование MVVM не целесообразно. Однако так как реализуемое приложение может кардинально меняться в процессе разработки, то архитектура с наилучшим масштабированием является приоритетной. Останавливаем выбор на MVVM. MVVM (Model-View-ViewModel) – шаблон проектирования архитектуры приложения, который представляет разделение кода приложения на три группы, которые имеют зависимости представленные на рисунке 11. View (Представление) – это сущность, отвечающая за пользовательский интерфейс как таковой, его отрисовку, а также слежку за действиями пользователя. В приложении представление реализуется с помощью графической составляющей библиотеки Swing. Model (Модель) описывает логику работы с данными в приложении (поиск, обработка, создание, хранение

и т.д.) кроме логики отображения этих данных. ViewModel (Модель представления) является абстракцией, которая связывает модель и представление, реализуя логику отображения данных. ViewModel извлекает данные из модели, форматирует и передаёт их представлению через оформленные представлением подписки на обновление. Представление в случае действия пользователя сообщает об этом модели представления, которое обращается к модели для обновления данных.

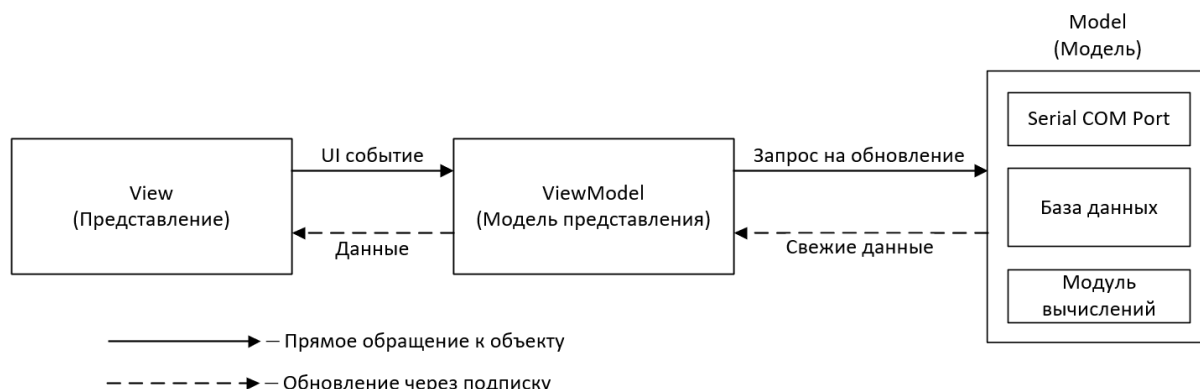


Рисунок 11 – Шаблон проектирования архитектуры MVVM

2.2.5 Источник питания для микроконтроллеров

Для питания базовых и искомой станций необходим 5В источник питания. Так как главная базовая станция будет соединена с сервером через USB, то питание будет передаваться по USB кабелю вместе с данными. Прочие базовые станции могут питаться от любого доступного источника питания. Используем внешний аккумулятор с USB выходом 5 В, 1 А постоянного тока ёмкостью 2000 мА·ч. Так как по характеристикам данный блок питания удовлетворяет требованиям микроконтроллера, то используем его. Альтернативным источником питания для базовых станций является сервер, к которому подключена главная базовая станция.

2.3 Разработка функциональной схемы системы

В разделе 2.2 были выбраны все составляющие системы локального позиционирования. Следующим шагом будет составление функциональной схемы.

В качестве искомой и базовых станций используются микроконтроллеры ESP32. Применяется четыре базовых станций и одна искомая. По BLE происходит передача сигнала от искомой станции к базовым. Питание базовых станций происходит от сервера, которым является персональный компьютер, через USB соединение. Для увеличения количества подключаемых по USB устройств используется USB разветвитель на 4 дополнительных разъёма. Внешний аккумулятор питает искомую станцию. По USB главная станция передаёт измерения серверу.

Принятые данные принимаются вычисляющей программой. Для измерений каждой базовой станции применяются фильтр RSSI, среднее арифметическое, преобразование RSSI в расстояние. Вычисленные для каждой станции расстояния до ИС используются для вычисления координат ИС. Дополнительно вычисляемые координаты фильтруются отдельным фильтром. Вычисленные координаты ИС передаются в модель представления, где форматируются в данные для графика. Форматированные данные передаются представлению, который обрисовывает изображение и передаёт его на дисплей компьютера.

Итоговая функциональная схема представлена на рисунке 12.

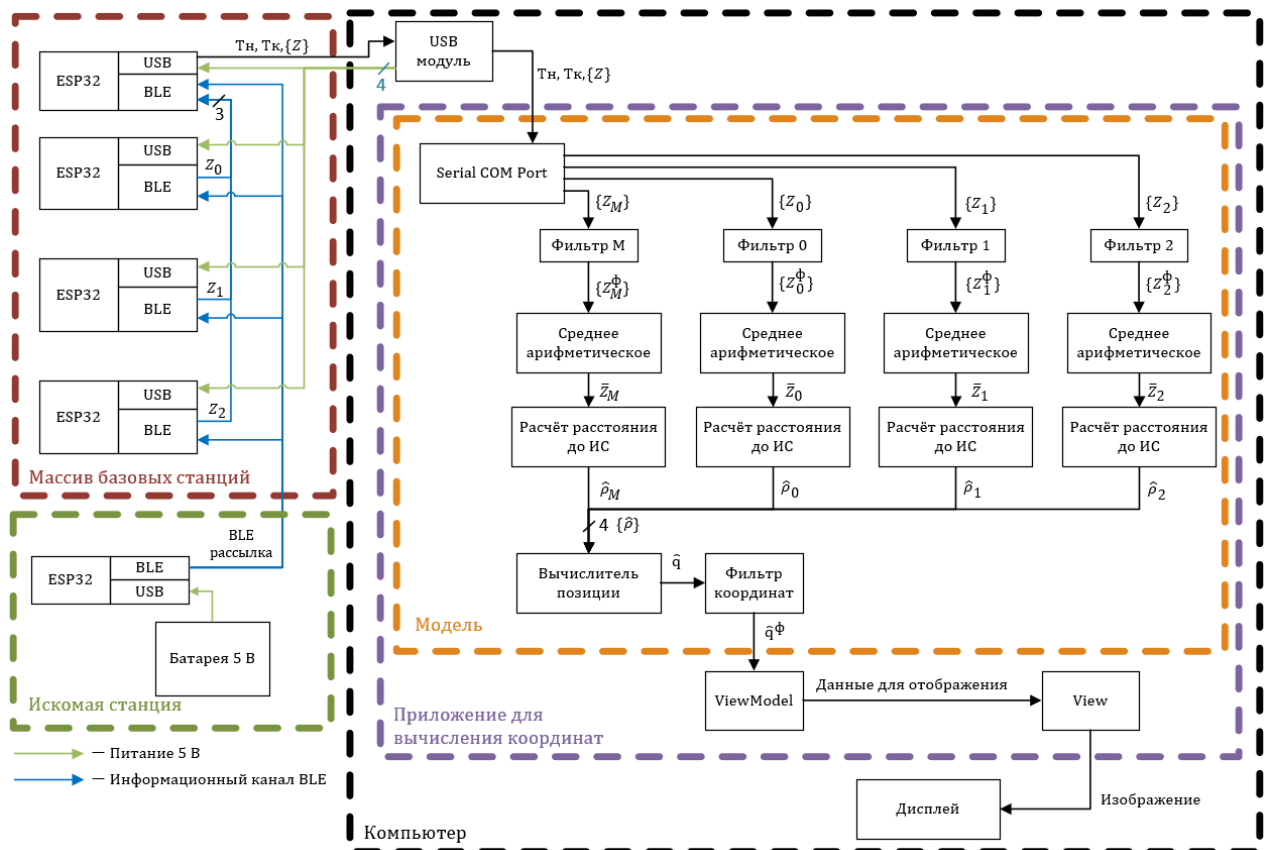


Рисунок 12 – Функциональная схема системы локального позиционирования по BLE

3 Разработка системы локального позиционирования

Далее реализуем спроектированную в предыдущем разделе систему локального позиционирования по BLE с помощью выбранных элементов системы и инструментов.

3.1 Разработка макета поля для позиционирования

Так как в ходе разработки системы выяснилось, что используемые микроконтроллеры имеют дальность связи по BLE не более 1.5 м, то поле для позиционирования было решено ограничить квадратом площадью 0.49 м². Внешний вид макета представлен на рисунке 13.

В качестве твёрдой основы использована лёгкая и дешёвая плита пенополистирольная ППС-9-Р-А. На ней очерчен квадрат со сторонами 70х70 см. Для удобства работы на поле нанесена разметка с шагом 10 см.

В углах квадрата расставлены базовые станции под углом 45 градусов направлением антенн к центру поля. Питание трёх станций осуществляется от ноутбука через USB разветвитель. Главная базовая станция подключается по USB кабелю к ноутбуку напрямую. Для уменьшения помех, вызванных искривлением распространения сигнала, все кабели вынесены за пределы рабочего поля.

Искомая станция подключена к внешнему аккумулятору по USB кабелю. Благодаря пенополистирольной основе базовую станцию можно зафиксировать на поле, если вдавить микроконтроллер выступающими контактами в платформу.

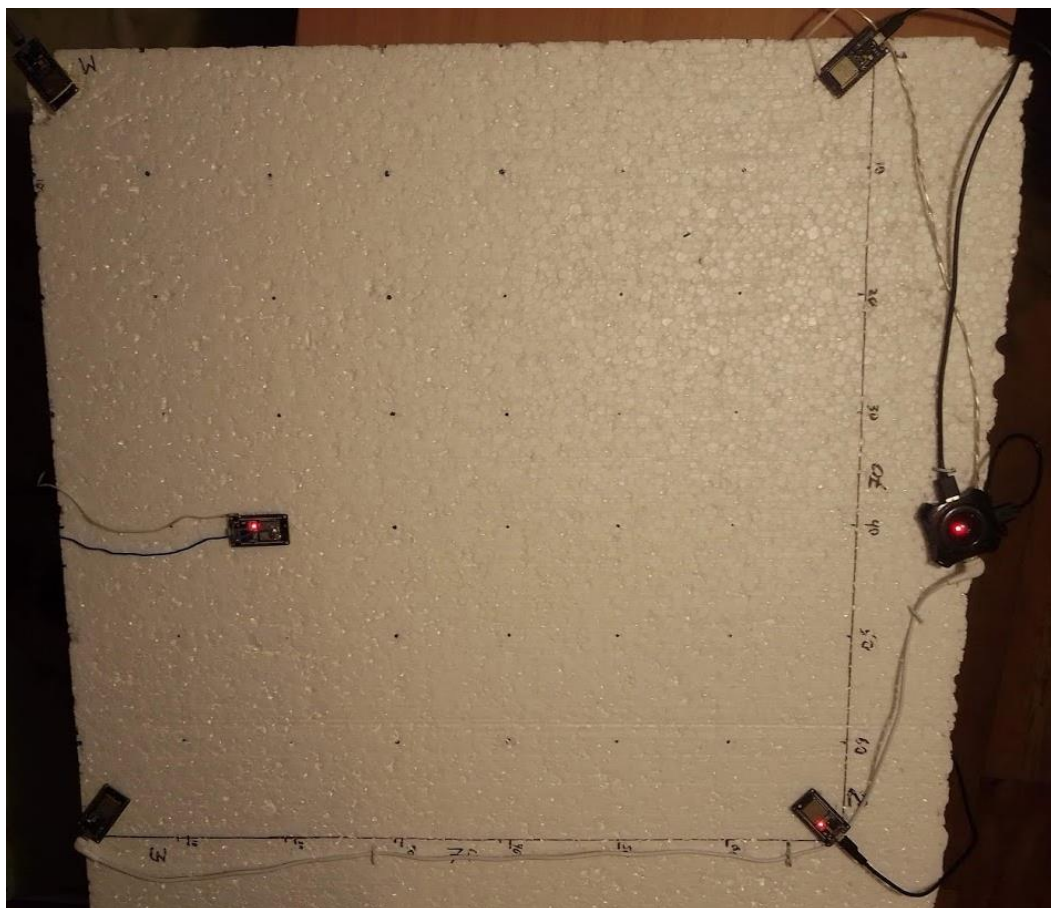


Рисунок 13 – Внешний вид макета поля для позиционирования

3.2 Разработка программы для искомой станции

Искомая станция должна рассылать пакеты с данными через BLE. Поэтому для этого была написана программа, которая сканирует пространство, производя поиск главной станции. Найдя таковую, искомая станция подключается к главной базовой. Блок-схема программы искомой станции представлена в приложении А на рисунке А.1. Код, загруженный в микроконтроллер, был написан с использованием инструментов, указанных в разделе 2.2.

3.3 Разработка программы для базовых станций

После подключения ИС к главной базовой главная БС должна разорвать соединение с ИС. Это делается для того, чтобы в будущем можно было учитывать возможность расширения количества ИС системе. В разрабатываемой

системе ограничимся одной возможной ИС. Далее главная БС распространяет другим БС идентификатор подключившейся ИС в виде MAC адреса. После чего все БС уходят в режим сканирования устройств. Единственное устройство, в котором заинтересованы БС, это ИС, идентификатор которой был сохранён в списке подключённых устройств в памяти БС. БС, которая приняла пакет данных от ИС должна измерить RSSI и отправить его по BLE главной БС. Главная БС также измеряет RSSI от ИС и сохраняет его вместе с RSSI от других станций в массиве из 50 элементов. Когда массив заполняется 50 элементами, то формируется сообщение, которое включает в себя время начала измерений, время конца измерений и массив RSSI, промаркированных MAC адресами источника сигнала и уникального номера БС, которая измерила данное значение. Время измеряется в миллисекундах по часам главной БС.

Для отключения ИС от сети позиционирования ИС должна снова подключиться к главной БС. В этом случае БС обнаружит, что подключившаяся ИС уже подключалась ранее и отправит уведомление другим БС о прекращении наблюдения за этой ИС.

Блок-схема программы главной базовой станции представлена на рисунке А.2 приложения А. Блок-схема программы остальных базовых станций – рисунке А.3 приложения А. Подпроцессы алгоритмов на рисунках А.2 и А.3 приведены на рисунке А.4 приложения А. Код, загруженный в микроконтроллер, был написан с использованием инструментов, указанных в разделе 2.2.

3.4 Разработка программы для сервера

Разработку приложения для серверной части проводилась согласно разделу 2.2. В IDE IntelliJ Idea создадим проект BluetoothPositioning. Установим дополнительный плагин для автоматического построения диаграммы классов [39].

Принимая шаблон проектирования архитектуры MVVM, разделим программу на три части. Начнём разработку с модели.

В пакете `filters` создадим классы, реализующие фильтр Калмана, медианный фильтр, адаптивную скользящую среднюю Кауфмана (рисунок 14). Все реализованные фильтры соответствуют их описанию в разделе 1.2.4. Каждый из фильтров наследуется от интерфейса `NiceFilter`, описывает методы для фильтрации массива входных данных и для копирования фильтра, чтобы для каждой связки БС и ИС был собственный фильтр. Дополнительно был реализован класс `FilterBunch`, реализующий идею каскада фильтров.

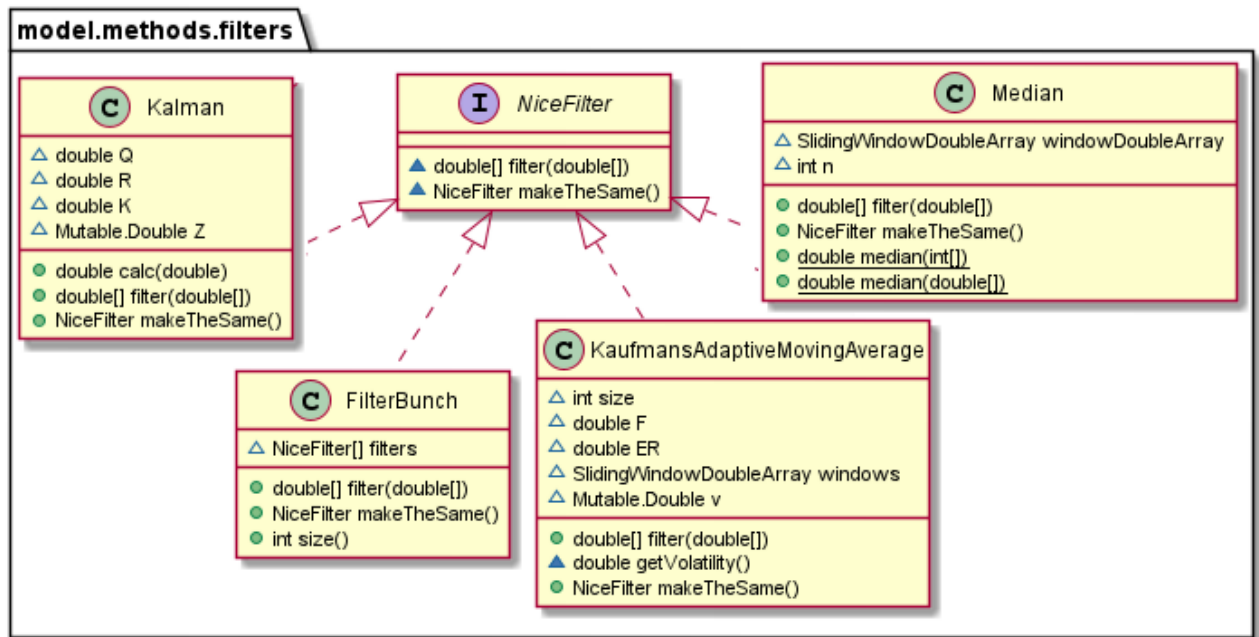


Рисунок 14 – Диаграмма классов пакета фильтров

Далее была реализована функция определения расстояния через формулу (4). Класс `Exponent` данной функции имплементирует интерфейс `DistanceFunction` (рисунок 15a). Если потребуется создать какие-либо другие функции для вычисления расстояния по известному RSSI, то эти функции будут также имплементировать этот интерфейс. Это требуется для того, чтобы код, в котором используются данные функции, не подвергался изменению при в коррекции самих функций. Класс `Mean` реализует функцию нахождения среднего арифметического значения массива данных. (рисунок 15б).

Обучение происходило отдельно по каждой оси, после чего модели для обеих осей были объединены в один класс. Диаграммы классов для методов оценки позиции представлены на рисунках (16–18). Все методы реализуют интерфейс Estimator, который содержит один единственный метод оценки.

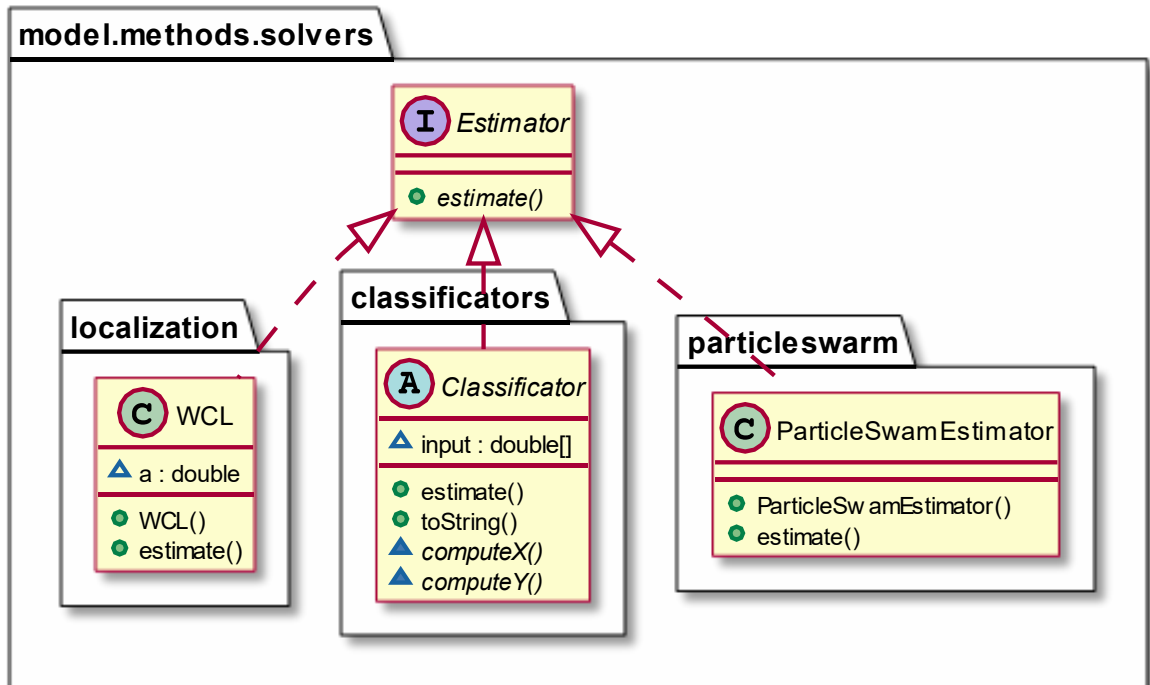


Рисунок 16 – Диаграмма классов пакета методов оценки позиции

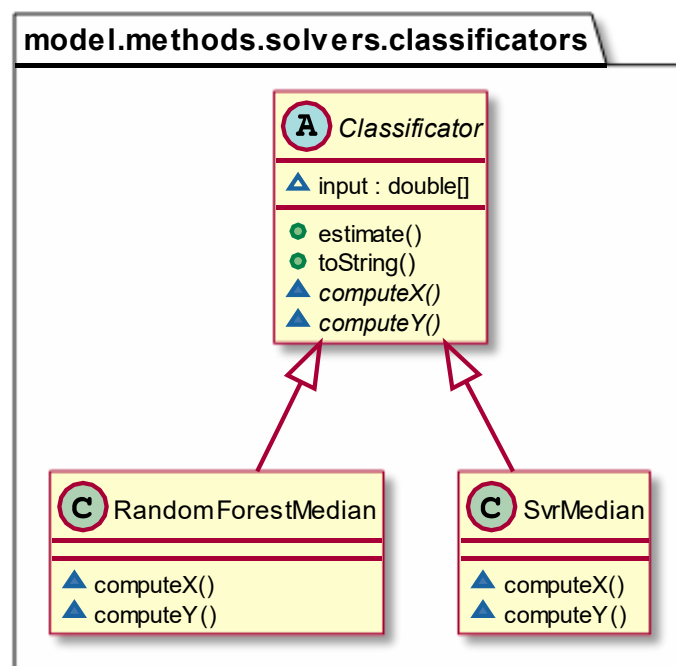


Рисунок 17 – Диаграмма классов пакета методов оценки позиции

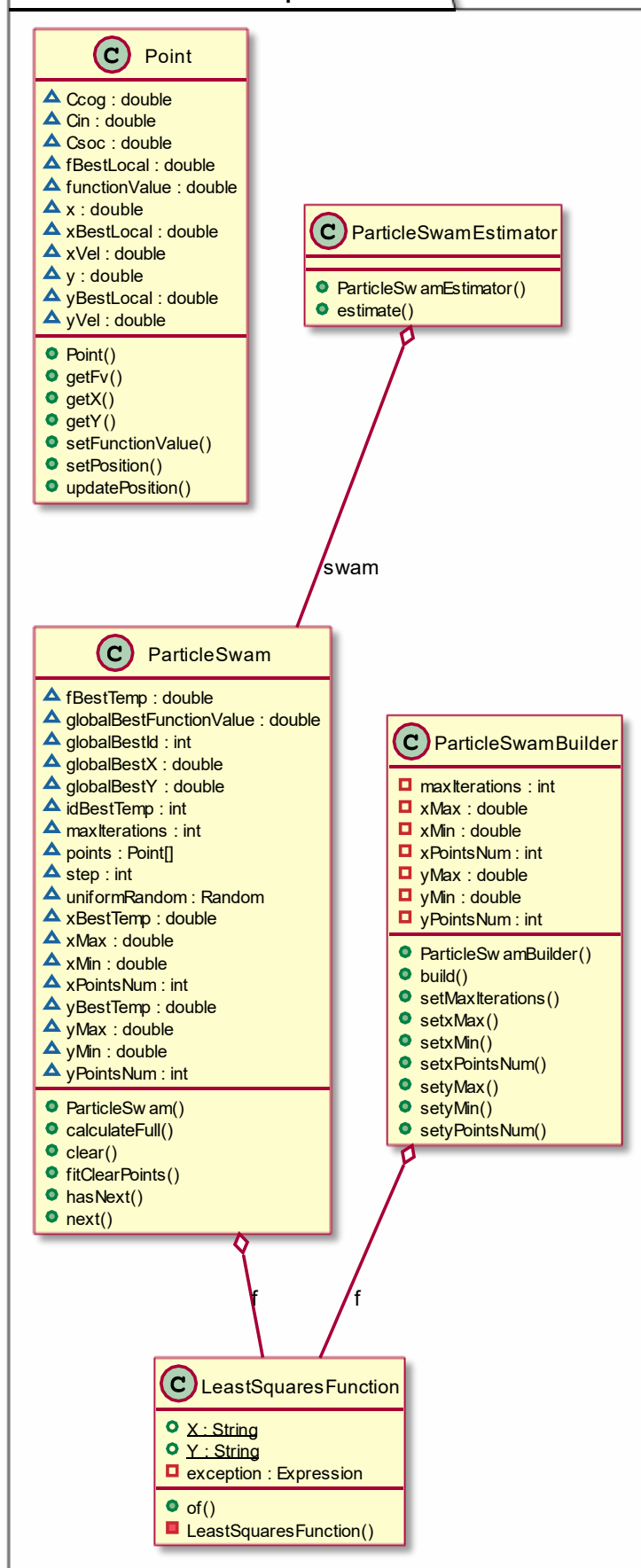


Рисунок 18 – Диаграмма классов пакета методов оценки позиции

Для обученных классификаторов была использована библиотека `scikit_learn` в среде Google Colaboratory [42]. Далее с помощью библиотеки `m2scgen` [43] модель была преобразована в код на языке Java, который используется в представленных выше классах.

Метод роя частиц был создан с применением библиотеки `exp4j` [44], которая позволяет составлять математические выражения из строки. Это очень полезно при изменении количества и координаты базовых станций. При использовании метода наименьших квадратов изменение для изменения матриц возможно либо через изменение программного кода, либо через написание собственного модуля, который будет учитывать количество и координаты станций. Библиотека `exp4j` является готовым решением автоматического изменения функции стоимости, которую необходимо минимизировать, при изменении массива базовых станций.

Для работы с такими базовыми сущностями как БС, MAC адрес, координаты были созданы классы `Beacon`, `MacAddress`, `Dimensions` соответственно (рисунок 19).

Хранение сырых измерений, отфильтрованных значений и рассчитанных координат используются классы `NiceStorage` и `PositioningStorage` (рисунок 20). Первое хранилище используется для записи обработанных значений RSSI измерений. Второе – для рассчитанных координат. Особенностью хранилища `NiceStorage` является то, что на принимаемые на вход значения сразу фильтруются. Это сделано для удобства обработки данных

Класс `Positioning` является сущностью, которая связывает фильтры RSSI, функции расчёта позиции, вычисление арифметического среднего, расчёт координат, фильтрацию рассчитанных координат в единый алгоритм позиционирования (рисунок 21).

Логика работы с данными представлена в классе `Model` (рисунок 22).

Для работы с COM портом с помощью библиотеки `jSerialComm` был создан пакет (рисунок 23), принимающий сообщения с микроконтроллера. Пакет состоит из непосредственно считывателя (`ComReader`) и слушателя

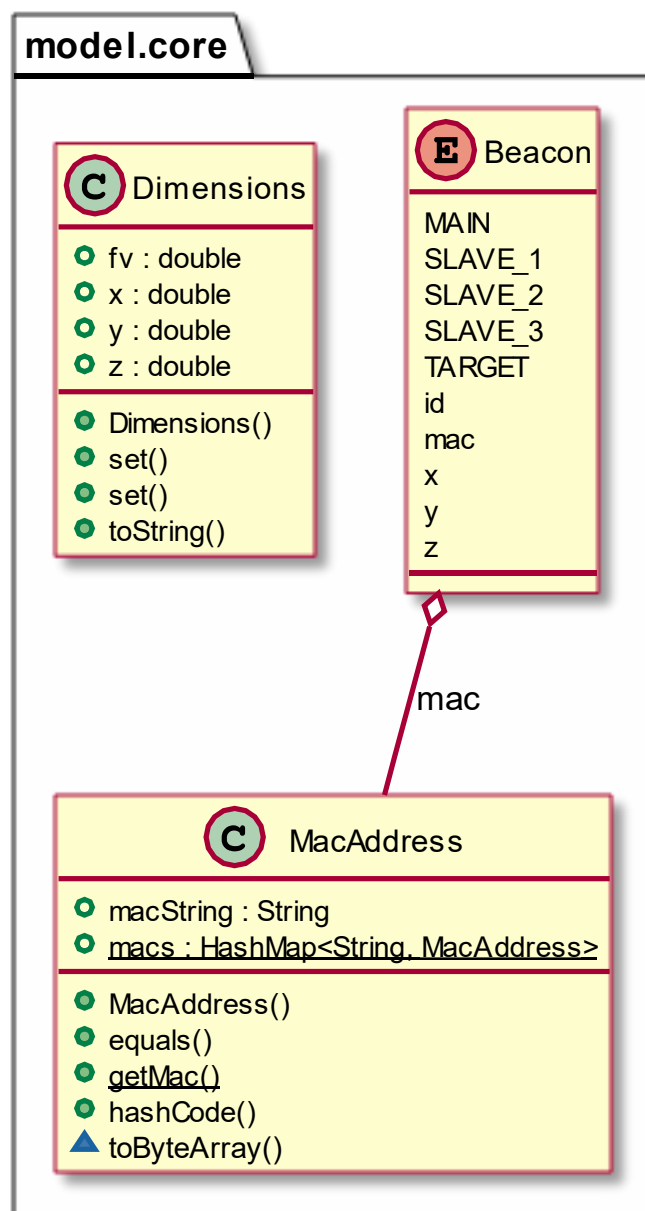


Рисунок 19 – Диаграмма классов пакета основных сущностей (ComListener), который сообщает модели о событии. ComReader реагирует на следующие события:

- `onError` – сообщение об ошибке во время выполнения программы на микроконтроллере;
- `onPayload` – пакет измерений;
- `onReady` – сообщение о готовности микроконтроллера к работе (при запуске программы);
- `onRestart` – сообщение о перезапуске микроконтроллера после ошибки или нажатия кнопки `reboot`;

- onSlavesNumber – информация о количестве базовых станций подключённых главной;
- onTargetsSet – массив искомых станций, подключённых к главной станции;
- onTerminal – вывод «сырого» сообщения, полученного с микроконтроллера.

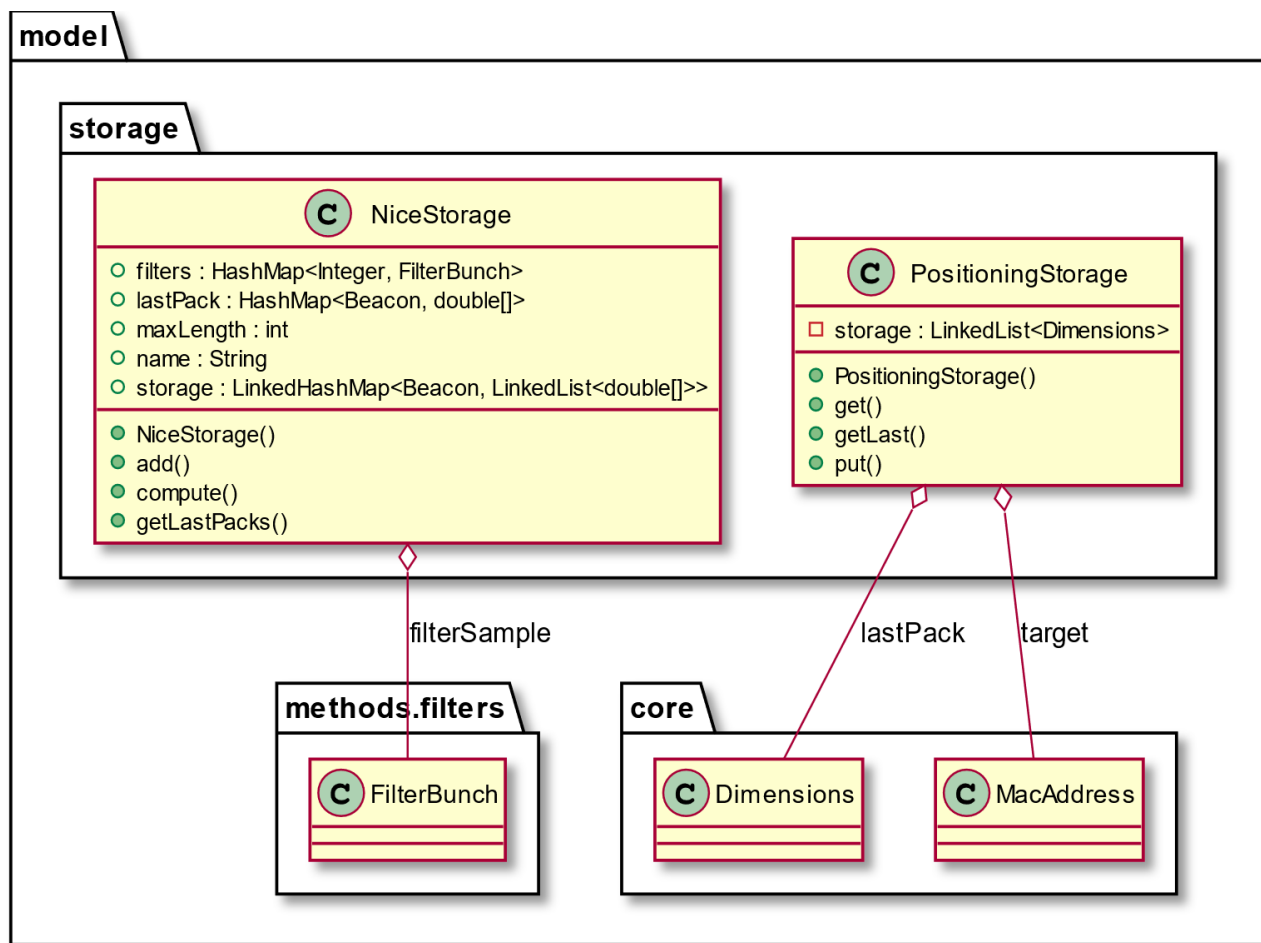


Рисунок 20 – Диаграмма классов пакета хранилищ данных

com.kamshanski.blepositioning.model.methods

C Positioning

- ▲ NiceFilter rssiFiltersBunchSample
 - ▲ HashMap<Beacon,NiceFilter> rssiFilters
 - ▲ HashMap<Beacon,MeanVariance> meanFunctions
 - ▲ HashMap<Beacon,DistanceFunction> distanceFunctions
 - ▲ Estimator coordinatesEstimator
 - ▲ FilterBunch xFilter
 - ▲ boolean meanFirst
 - PositioningStorage storage
 - StringBuilder log
-
- Dimensions of (HashMap<Beacon,double[]>)
 - String getLog()

Рисунок 21 – Диаграмма класса, реализующего полный алгоритм позиционирования

model

C Model

- explsOn : boolean
 - experimentalStorages : ArrayList<ComplexStorage>
 - latestPosition : LiveData<HashMap<String, Dimensions>>
 - latestRssiMeasuring : LiveData<HashMap<String, HashMap<Beacon, double[]>>>
 - processingFinished : LiveData<Integer>
 - rssiStorages : ArrayList<NiceStorage>
 - slavesNum : LiveData<Integer>
 - targetsMacs : LiveData<MacAddress[]>
 - targetsNum : LiveData<Integer>
 - instance : LiveData<Model>
 - positionings : Map<String, Positioning>
 - targetsCapacity : int
-
- getClearInstance()
 - getExpStorages()
 - getTargetsSetString()
 - getTargetsString()
 - parseTargetsMacs()
 - putNewMeasurements()
 - setSlavesNum()
 - setTargets()
 - Model()

Рисунок 22 – Диаграмма класса работы с данными

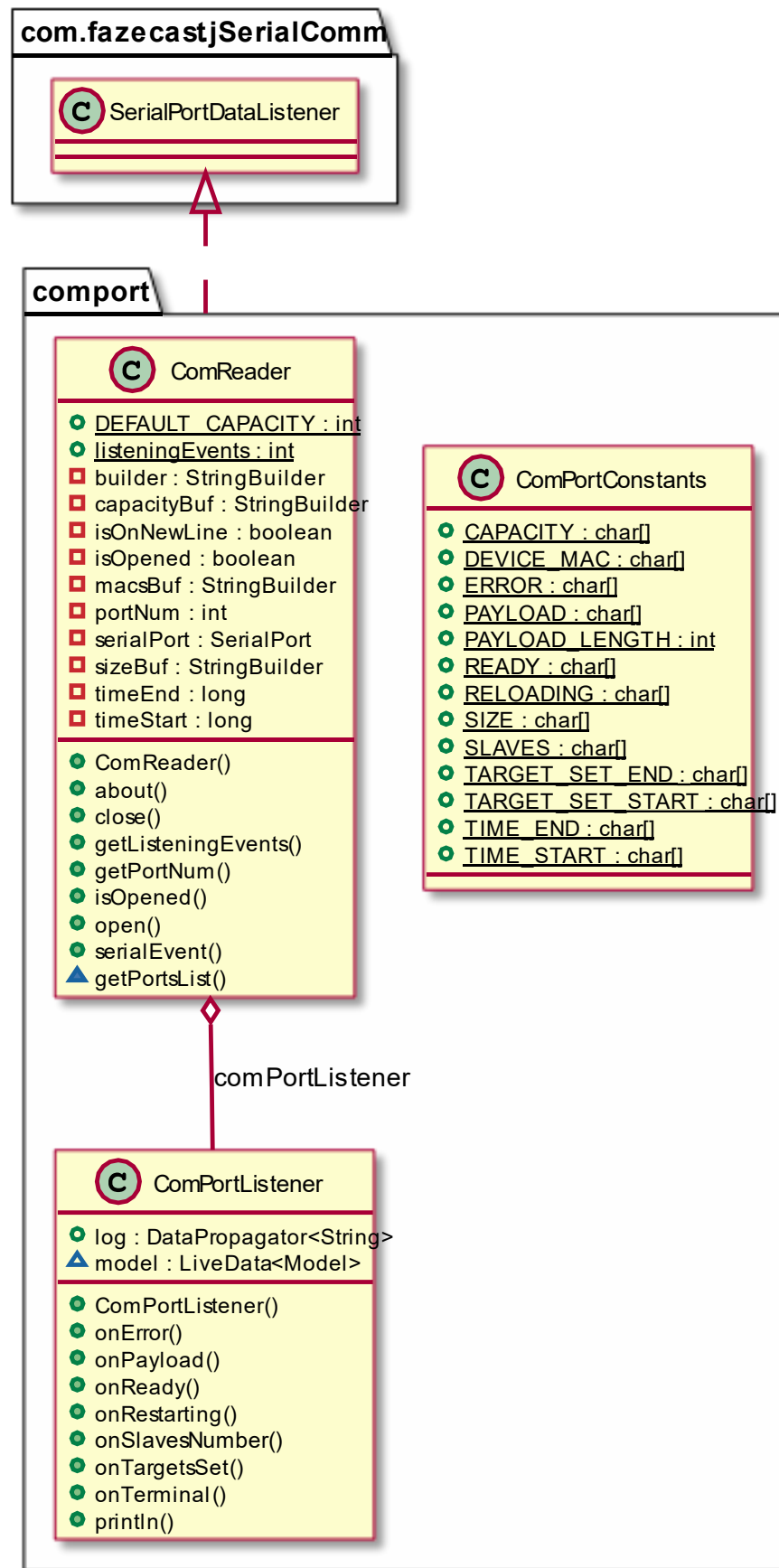


Рисунок 23 – Диаграмма классов пакета обработки сообщений с микроконтроллера через COM порт

Данный класс является отличительной особенностью разрабатываемой системы. Он позволяет самостоятельно определить обработку сообщений, принимаемых с физических устройств. Приведённая реализация использует COM порт, по которому устройства передают информацию на сервер. Для иных подключений данный класс может быть видоизменён.

После модели были реализованы модель представления (ViewModel) и само представление (View). Передача данных из модели во ViewModel и из ViewModel во View происходит посредством подписок. В классе View была создана разметка графического интерфейса, задана обработка нажатия кнопок и прочих элементов, приведены графики и поля вывода сообщений (рисунок 24).

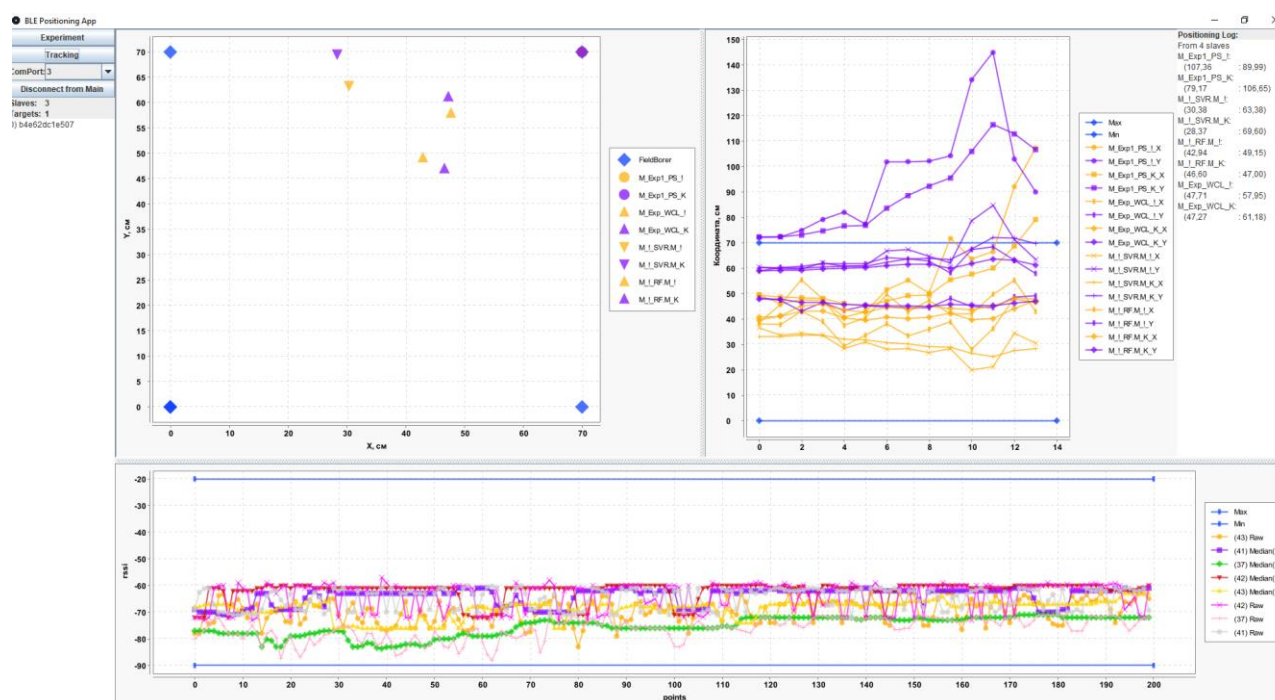


Рисунок 24 – Внешний вид пользовательского интерфейса

3.5 Поиск наилучших параметров

После сборки стенда системы локального позиционирования по Bluetooth и разработки программного обеспечения для работы с ним, необходимо найти оптимальные параметры для используемых методов экспериментальным методом.

3.5.1 Поиск параметров для функции расстояния

Начнём поиск с функции расстояния между двумя станциями. Для вычисления расстояния между ИС и БС используется формула Фрииса в форме (4). Так как данная формула включает в себя с мощность, выраженную в мВт, то с помощью выражения (1) и других преобразований приведём исходную формулу к виду, удобному для вычислений:

$$\lg\left(\frac{P_i[\text{мВт}]}{1[\text{мВт}]}\right) = \lg\left(k \frac{P[\text{мВт}]}{1[\text{мВт}]} \rho^{-a}\right), \quad (56)$$

$$RSSI_i[\text{дБм}] = RSSI[\text{дБм}] + K - 10a \cdot \lg(e) \cdot \ln(\rho), \quad (57)$$

$$RSSI_i = k' - b \ln(\rho), \quad (58)$$

$$\rho = e^{\frac{RSSI_i - k'}{b}}, \quad (59)$$

$$\rho = e^{\alpha RSSI_i + \beta}, \quad (60)$$

где α и β – параметры функции расстояния.

Расстояние в виде (60) представлено в программе, разработанной выше.

Для поиска параметров α и β была собрана большая выборка измерений RSSI с каждой БС для ИС в разных точках стенда. ИС помещалось в точки, представленные на рисунке 25. Для каждой точки было записано от 800 до 3000 значений RSSI. Для каждой станции значения усреднялись. Далее в отдельную таблицу были занесены усреднённые значения RSSI измеренного БС и расстояния от БС до ИС. По данной выборке с помощью средств пакета Microsoft Excel была найдена аппроксимирующая прямая вида (58), которая затем была преобразована к виду (60). Пример выборки с усреднёнными RSSI представлен на рисунке 26.

Результатом поиска параметров α и β служит таблица 9, которая содержит все значения параметров для каждой базовой станции.

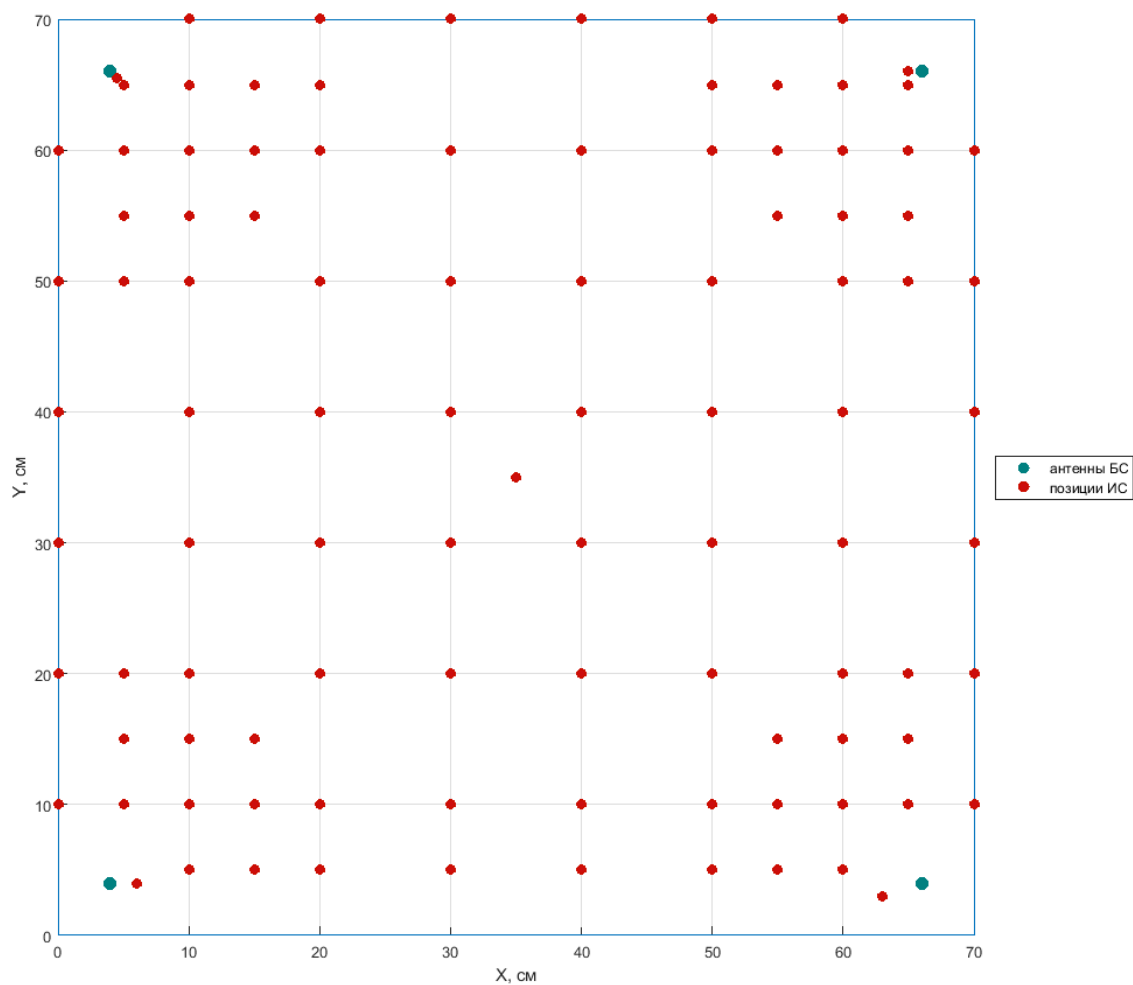


Рисунок 25 – Сетка точек, использованных поиска параметров функции расстояния

Главная БС

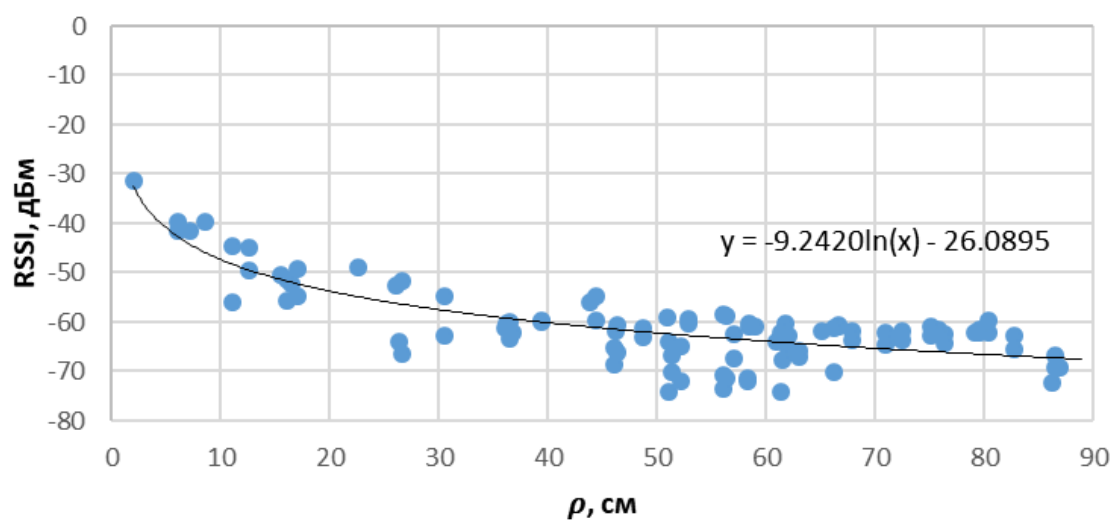


Рисунок 26 – Пример выборки главной БС зависимости RSSI от расстояния с усреднёнными значениями RSSI для каждой точки

Таблица 9 – Параметры α и β

Номер БС	α	β
Main	-0.03833	-0.3542
1	-0.02606	-0.1719
2	-0.03365	-0.3001
3	-0.03651	-0.3211

3.5.2 Поиск параметров для фильтров

В программе были реализованы фильтр Калмана, медианный фильтр и адаптивная скользящая средняя Кауфмана. Параметрами первого являются дисперсия шума Q и дисперсия ошибки измерений R . Медианный фильтр характеризуется размером окна n . Адаптивная средняя Кауфмана – размер окна n и коэффициенты f и s .

Для медианного фильтра лучшим параметром оказался размер окна равный семи. На рисунках (27–29) представлена работа этого фильтра. Фильтр хорошо справляется с аномальными измерениями, а также не сильно искривляет кривую в динамическом режиме и имеет небольшое запаздывание.

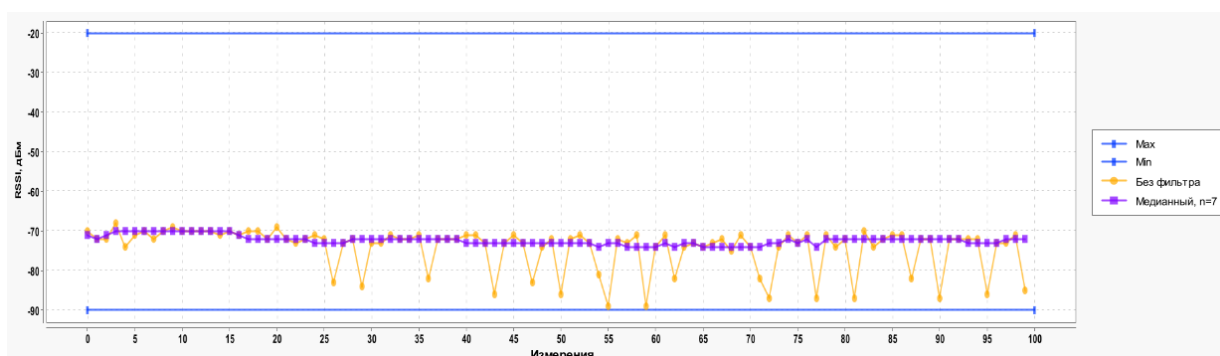


Рисунок 27 – Работа медианного фильтра с размером окна $n = 7$ при статической ИС

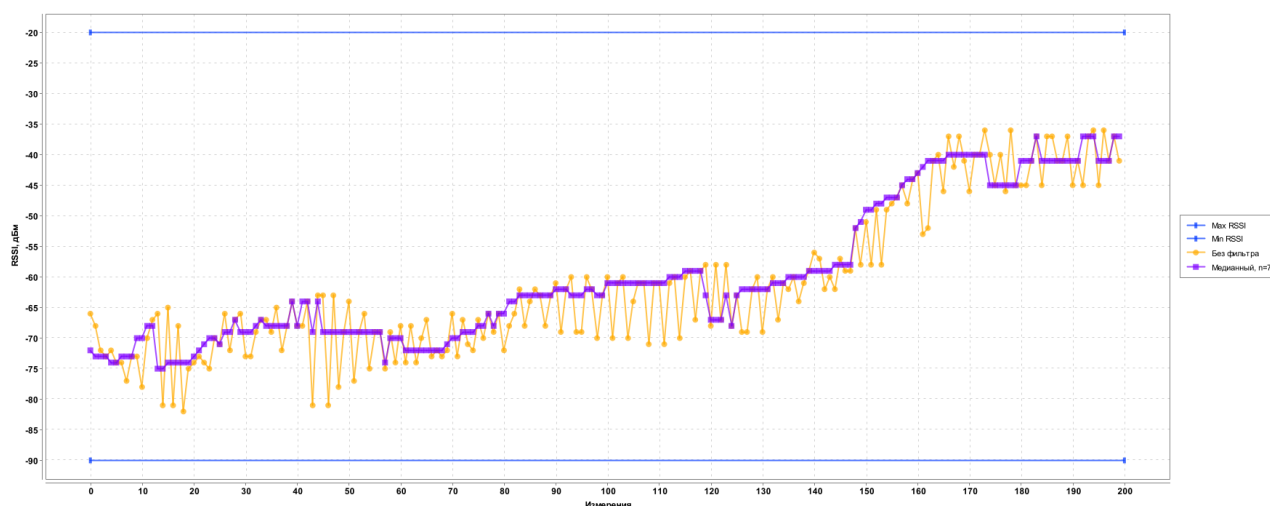


Рисунок 28 – Работа медианного фильтра с размером окна $n = 7$ при медленном движении ИС

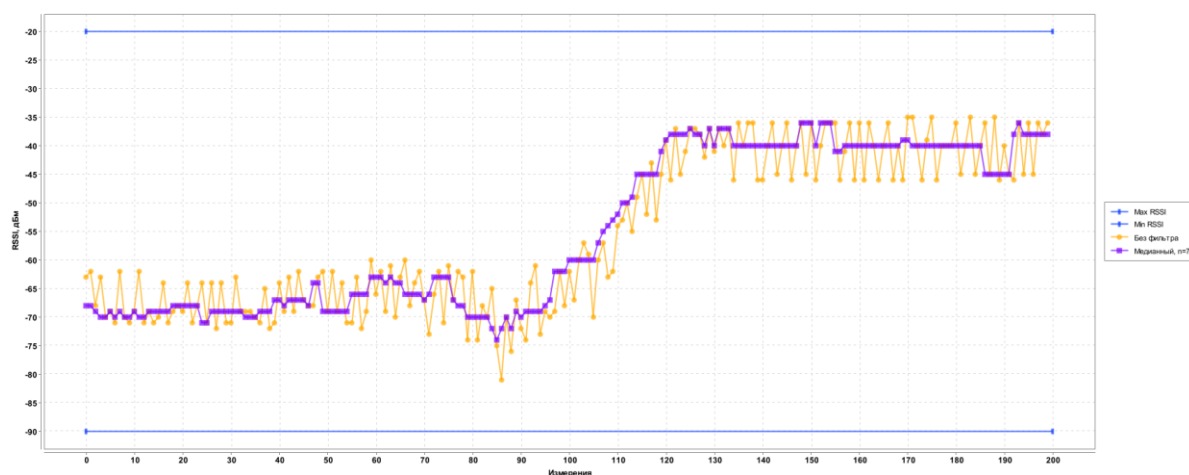


Рисунок 29 – Работа медианного фильтра с размером окна $n = 7$ при быстром движении ИС

Так как для используемых микроконтроллеров не указана дисперсия ошибки измерения в технической документации, то подбор R и Q осуществлялся вручную. Для фильтра Калмана были найдены оптимальные параметры $R = 2$ и $Q = 0.2$. Как видно из рисунков (30–32) фильтр даёт хорошее сглаживание сигнала, удаляя шум, с низким запаздыванием как при движущейся ИС, так и при статической.

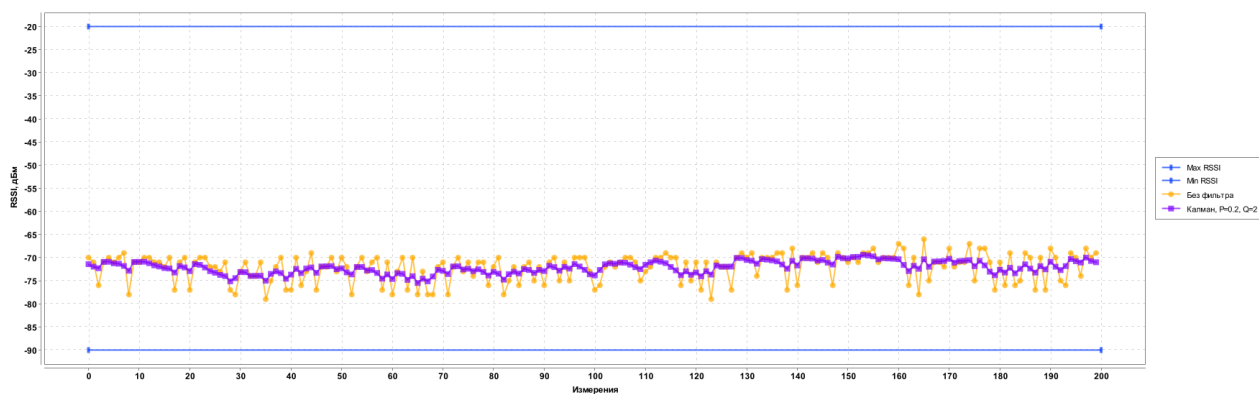


Рисунок 30 – Работа фильтра Калмана с параметрами $R = 2$ и $Q = 0.2$ при статической ИС

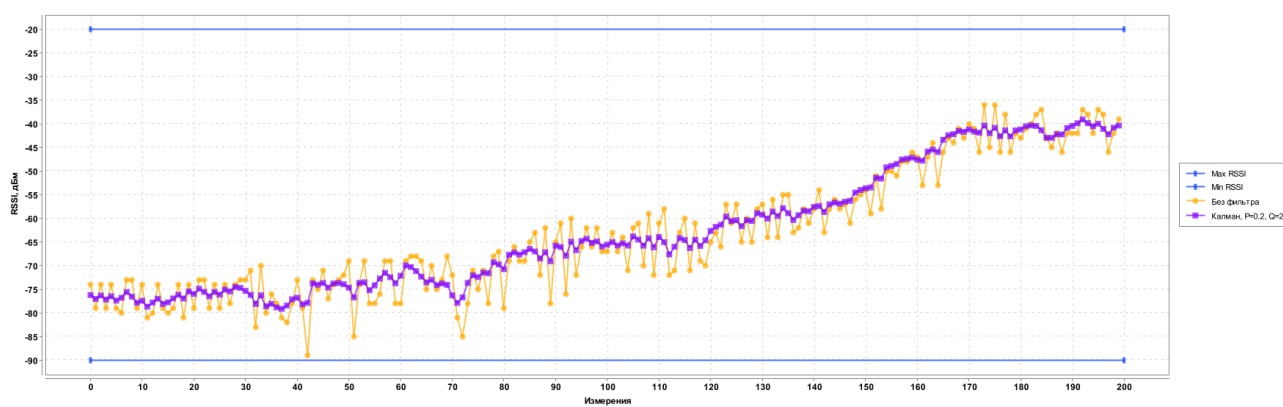


Рисунок 31 – Работа фильтра Калмана с параметрами $R = 2$ и $Q = 0.2$ при медленном движении ИС

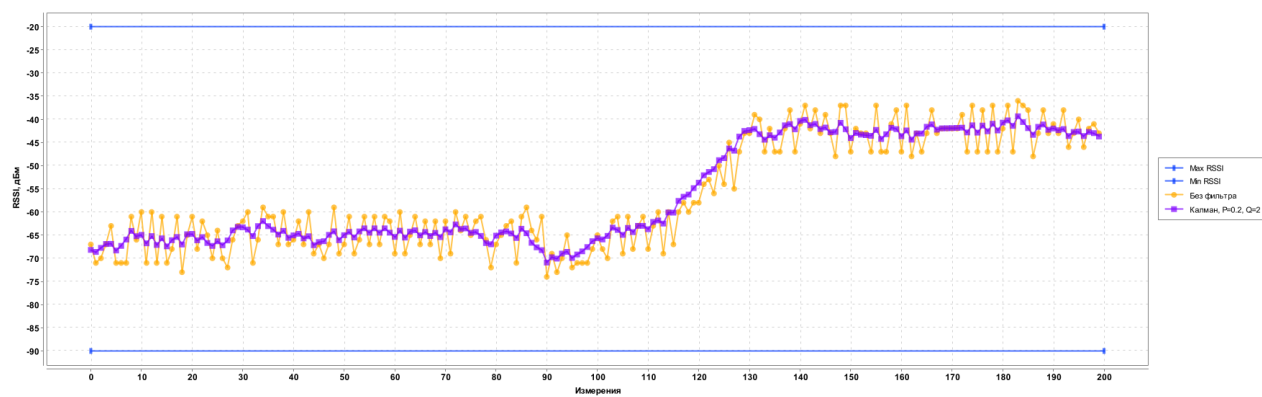


Рисунок 32 – Работа фильтра Калмана с параметрами $R = 2$ и $Q = 0.2$ при быстром движении ИС

Для фильтра Кауфмана найти параметров, которые превосходили по сглаживанию и по величине задержки фильтр Калмана с параметрами выше, не удалось, поэтому для работы с данными был выбран фильтр Калмана. Работа адаптивной скользящей средней Кауфмана с параметрами $n = 10$, $s = 3$ и $f = 20$ представлена на рисунках (33–35), на которых видно большое запаздывание при высокой степени сглаживания. Так как для фильтра Кауфмана не удалось найти оптимальных настроек, то от него было решено отказаться. Далее в работе использовался только фильтр Калмана в качестве сглаживающего фильтра.

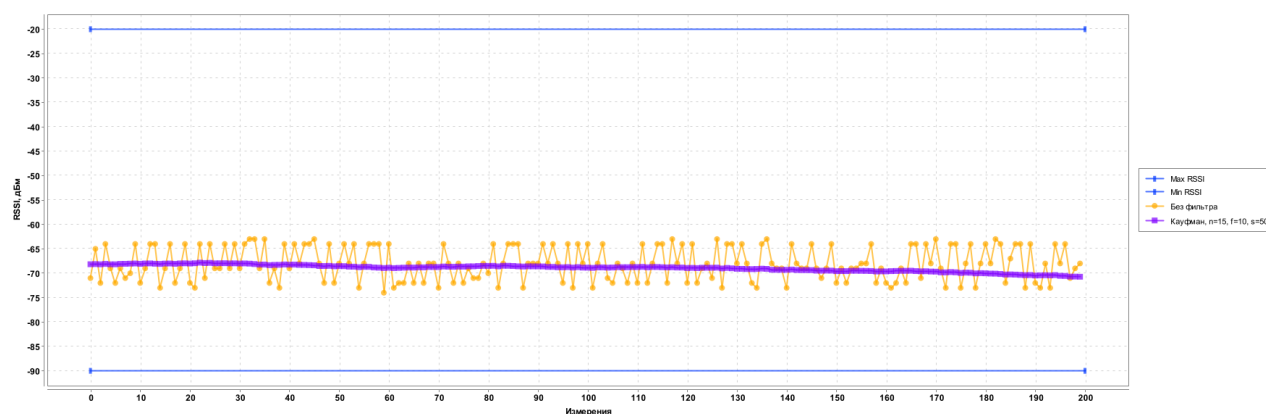


Рисунок 33 – Работа адаптивной скользящей средней Кауфмана с параметрами $n = 10$, $s = 3$ и $f = 20$ при статической ИС

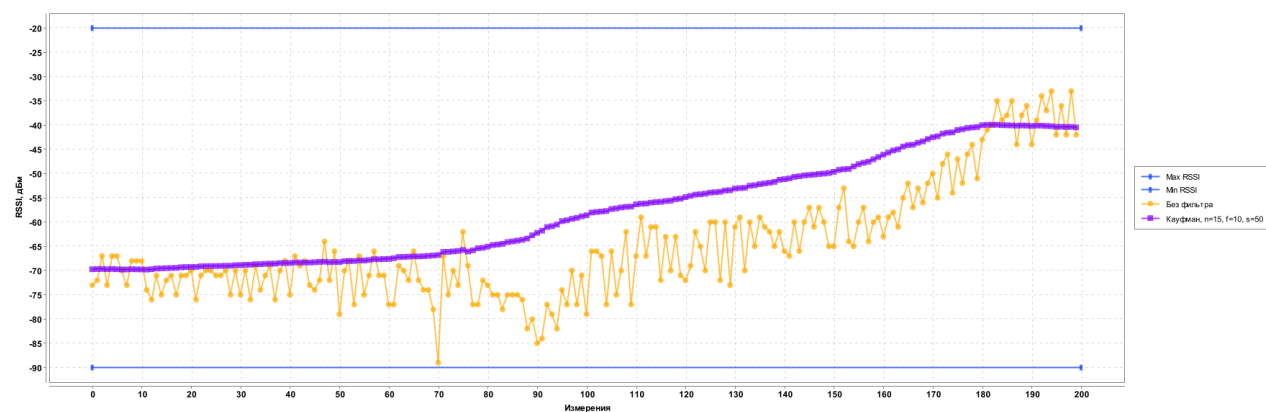


Рисунок 34 – Работа адаптивной скользящей средней Кауфмана с параметрами $n = 10$, $s = 3$ и $f = 20$ при медленном движении ИС

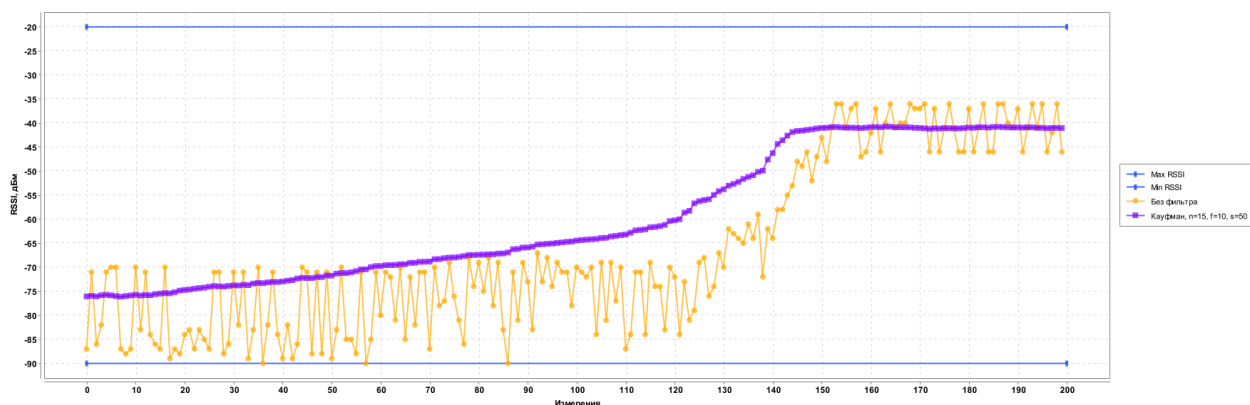


Рисунок 35 – Работа адаптивной скользящей средней Кауфмана с параметрами $n = 10$, $s = 3$ и $f = 20$ при быстром движении ИС

3.5.3 Поиск параметров для методов оценки позиции

В программном обеспечении были разработаны 3 метода оценки позиции. Рассмотрим применение каждого по отдельности.

Метод роя частиц – это громоздкий метод, которые имеет множество настраиваемых параметров. В данной работе с точки зрения точности и скорости работы были выбраны следующие параметры:

- область поиска: (0-70) по оси X, (0-70) по оси Y;
- количество точек: 100
- условие остановки поиска: максимум итераций 500;
- инерционный коэффициент c_{in} : случайно от 0 до 1;
- когнитивный коэффициент c_{soc} : случайно от 0 до 1;
- социальный коэффициент c_{soc} : случайно от 0 до 1;
- начальная скорость: случайно от 0 до 1.

С такими коэффициентами скорость оценки координаты ИС составляет не более 10 мс при не «разогретой» виртуальной машине.

В разделе 1.2.3.2 было сказано, что для метода WCL всегда существует ошибка оценки позиции ввиду особенности его работы, был произведён анализ поля, на котором планируется испытание системы, чтобы найти коэффициент затухания среды a , при котором средняя ошибка позиционирования на поле будет минимальной. Для наглядности построим карту ошибок определения

позиции методом WCL для области, в которой 4 базовых станций располагаются в координатах угла квадрата $(0, 0)$, $(0, 70)$, $(70, 70)$ и $(70, 0)$. Положим, что расстояние до ИС в любой точке пространства для любой БС вычисляется идеально точно, $\hat{\rho} = \rho$. Ошибка ε будет считаться, как евклидово расстояние между истинным положением ИС q и рассчитанным \hat{q} , т.е.:

$$\varepsilon = \sqrt{(\hat{q} - q)^T (\hat{q} - q)}. \quad (61)$$

В качестве коэффициента затухания выберем α равное 1, 2 и 3. Карта ошибок представлена на рисунке 36.

Как видно из рисунка 36 наибольшая ошибка наблюдается за пределами квадрата, определённого четырьмя базовыми станциями, и возле граней квадрата. Наименьшая ошибка наблюдается в центре области и непосредственно возле самих БС. Это объясняется тем, что согласно формуле (27) каждая из БС с определённой долей «перетягивает» \hat{q} ближе к себе, даже при том, что расстояние до некоторых из них мало.

Для выбранных коэффициентов затухания наименьшая средняя ошибка для всех точек в области квадрата была получена при коэффициенте равном 2 (рисунок 36б). Построим график (рисунок 37), показывающий среднюю ошибку в области квадрата для различных коэффициентов затухания.

В ходе испытаний было выявлено, что лучшее определение позиции достигается при $\alpha = 2.1$. Поэтому для данного метода использовался такой параметр.

При обучении моделей с помощью методов опорных векторов и случайного леса были использованы параметры библиотеки `scikit_learn` установленные по умолчанию.

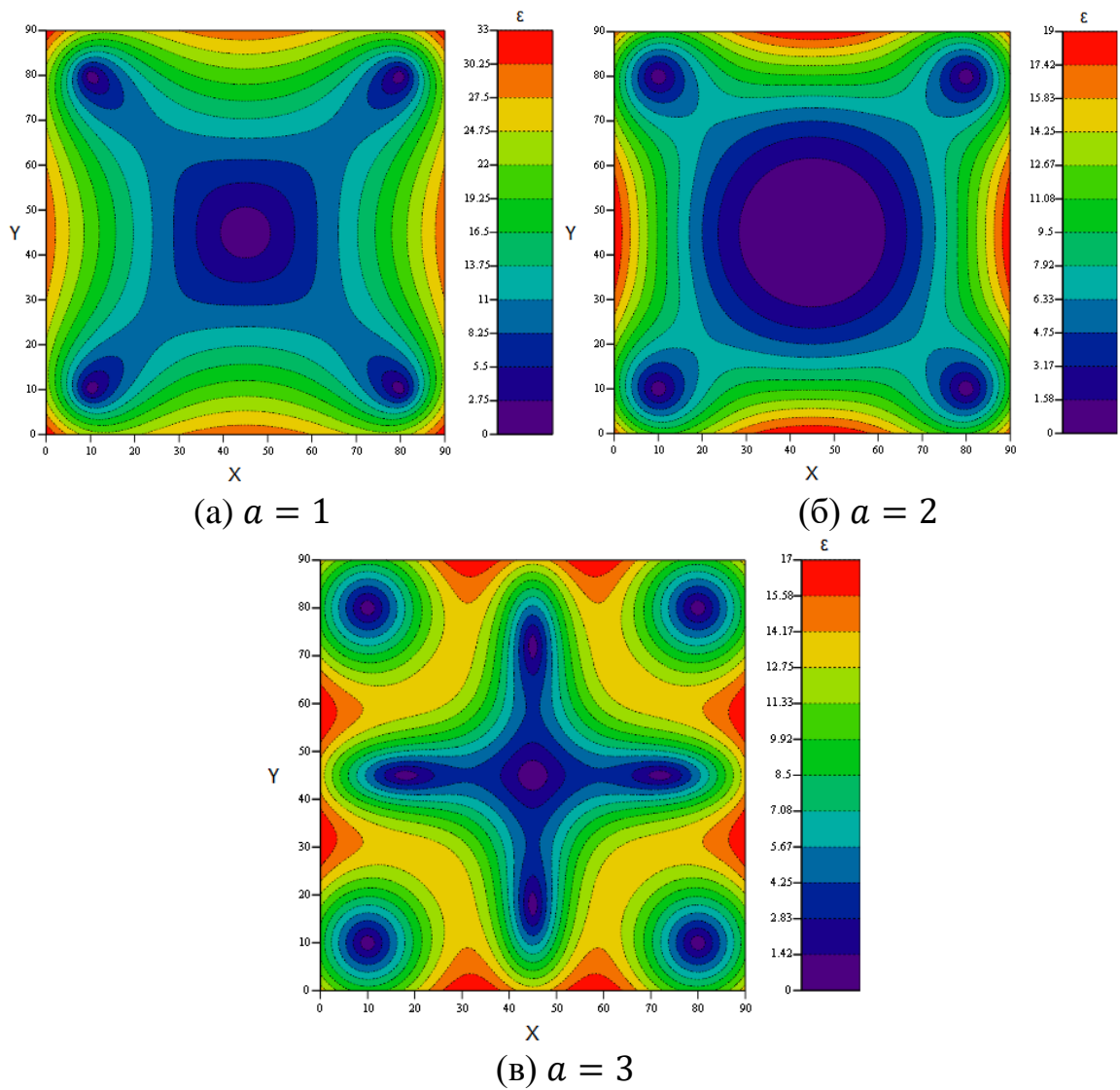


Рисунок 36 – Карта ошибок метода WCL для БС в углах квадрата размера 70x70 с различным параметром a

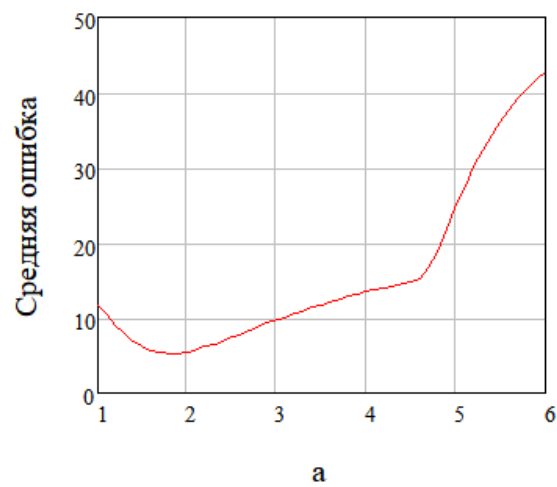


Рисунок 37 – Зависимость средней ошибки метода WCL для квадрата 70x70 от коэффициента затухания

4 Анализ разработанной системы

Проведём анализ разработанной системы на созданном стенде, а также рассмотрим результаты относительно приведённых в начале работы аналогов.

4.1.1 Тестирование разработанной системы

В программном обеспечении были разработаны 3 метода оценки позиции. Рассмотрим применение

Для разработанного стенда и программного обеспечения были проведены тесты на точность определения позиции ИС. Измерения проходили в точках, отмеченных на рисунке 38. Было выбрано несколько точек по диагоналям, по периметру и в центре поля.

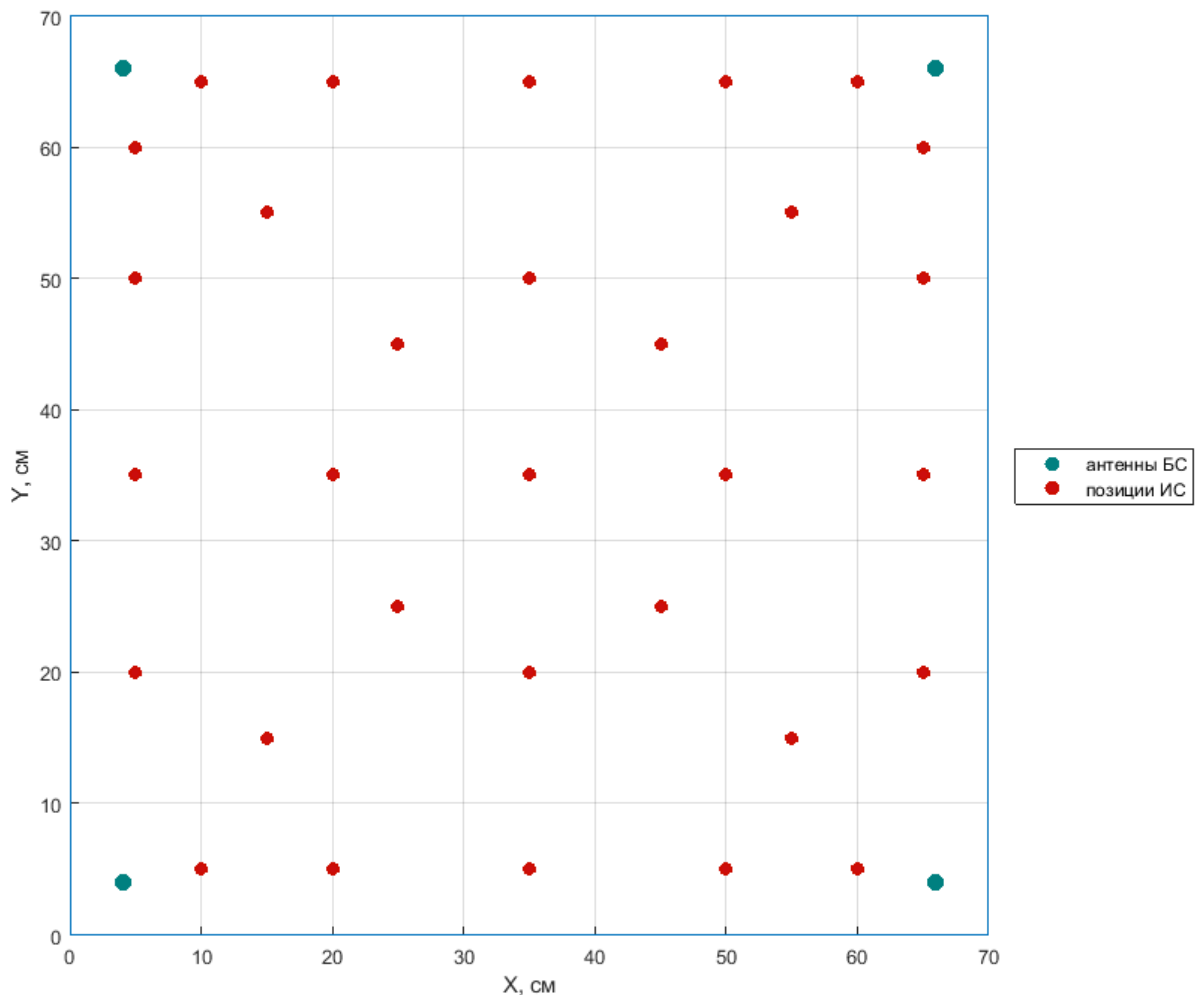


Рисунок 38 – Сетка точек, использованных поиска точности позиционирования разработанного стенда и ПО

Метрикой ошибки ε являлось расстояние между истинными координатами q и рассчитанными \hat{q} , т.е.(61). Помимо ошибки считалась также дисперсия σ^2 для каждой выборки, чтобы определить качество работы фильтра координат, по формуле [45]:

$$\sigma^2 = \frac{\sum(\varepsilon - \bar{\varepsilon})^2}{n}, \quad (62)$$

где $\bar{\varepsilon}$ – среднее значение ошибки расстояния между истинными координатами q и рассчитанными \hat{q} ;

n – количество измеренных точек.

К исследованию были приведены следующие наборы методов (таблица 10). На первом шаге осуществляется фильтрация массива RSSI медианным фильтром для удаления аномальных измерений. На втором шаге применяется один из методов оценки позиции. На третьем шаге – фильтрация рассчитанных координат.

Таблица 10 – Исследуемый набор методов

№ шага / шаг	№ набора методов							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1. Фильтрация RSSI	Медианный фильтр							
2. Оценка позиции	Метод роя частиц	SVR	RF	WCL	Метод роя частиц	SVR	RF	WCL
3. Фильтрация координат	-				Фильтр Калмана			

Для каждого алгоритма были проведены несколько измерений. На рисунках (39–42) можно наблюдать ошибку измерения для каждого метода. Средняя дисперсия расстояний от реальных координат до измеренных приведена в таблице 12.

Как видно из рисунков наименьшая ошибка получается при позиционировании методом роя частиц с использованием экспоненциальной

модели затухания сигнала. Такую ошибку можно объяснить тем, что данный метод опирается на измерение расстояния с помощью модели (60) с коэффициентами из таблицы 9. Так как для экспоненциальной кривой при больших показателях степени, т.е. при значительном расстоянии между маячками, малейшие изменения шума значительны, то определение позиции данным методом является трудной задачей. Также маячки довольно чувствительны к изменению положения, так как геометрия антенны плохо подходит для целей позиционирования, что фактически вносит не учитываемую ошибку при оценке позиции.

Прочие методы показали гораздо меньшую ошибку. Это объясняется тем, что методы не нацелены на физику процесса. Методы SVR и RF полагаются только на статистическую составляющую измерений, а метод WCL использует экспоненциальные веса. Трое методов имеют также низкую дисперсию ошибки позиционирования.

Легко заметить, что для методов SVR и RF ошибка распределена более равномерно, чем для WCL. Это объясняется тем, что метод WCL включает ошибку, которая определена самим методом (рисунок 36). Это значит, что наименьшая ошибка позиционирования получается возле БС и в центре поля.

В таблице 11 можно наблюдать среднюю ошибку позиционирования $\bar{\epsilon}$, которая заметно ниже для методов модели RF. Наибольшая ошибка получается при работе метода роя частиц.

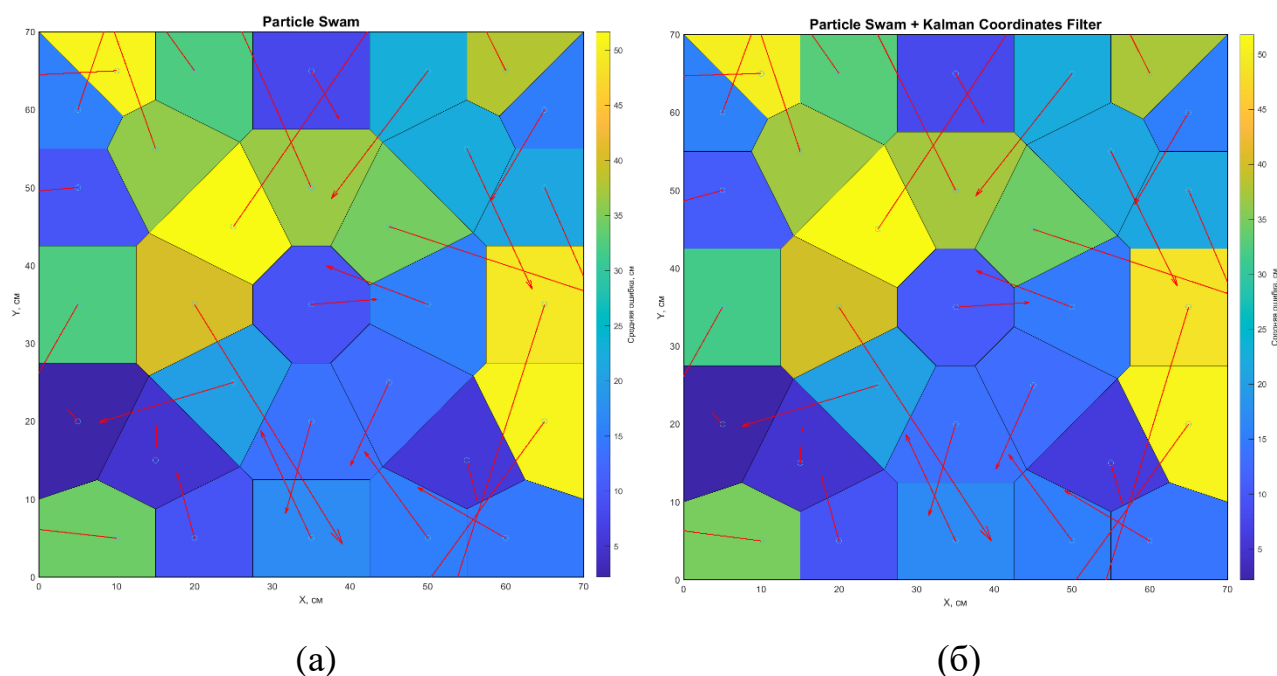
Таблица 11 – Ошибка позиционирования

Метод оценки позиции	Метод роя частиц	SVR	RF	WCL
Средняя ошибка позиционирования без фильтра Калмана $\bar{\epsilon}$, м	23.942	13.855	13.176	14.348
Средняя ошибка позиционирования с фильтром Калмана $\bar{\epsilon}$, м	23.957	13.857	13.146	14.514

По таблице 12 можно заметить, что дисперсия ошибки позиционирования σ^2 резко снижается при использовании фильтра Калмана для фильтрации рассчитываемых координат. При этом средняя ошибка позиционирования практически не изменяется.

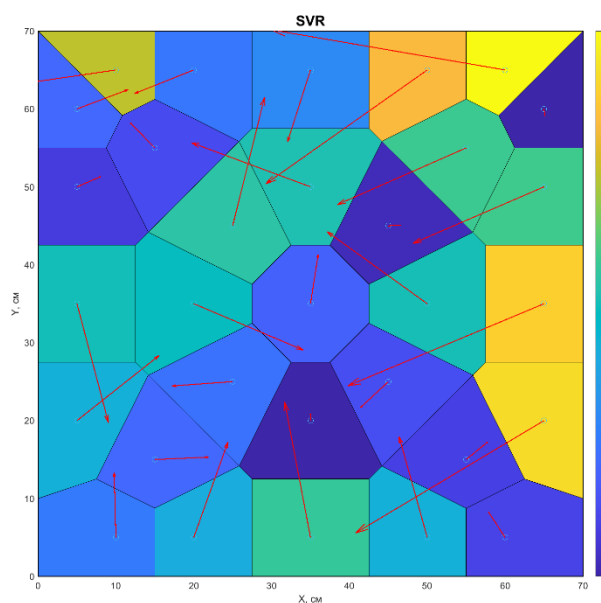
Таблица 12 – Дисперсия позиционирования

Метод оценки позиции	Метод роя частиц	SVR	RF	WCL
Дисперсия без фильтра Калмана σ^2 , см ²	165.195	20.624	30.328	19.087
Дисперсия с фильтром Калмана σ^2 , см ²	62.064	5.959	7.340	5.883

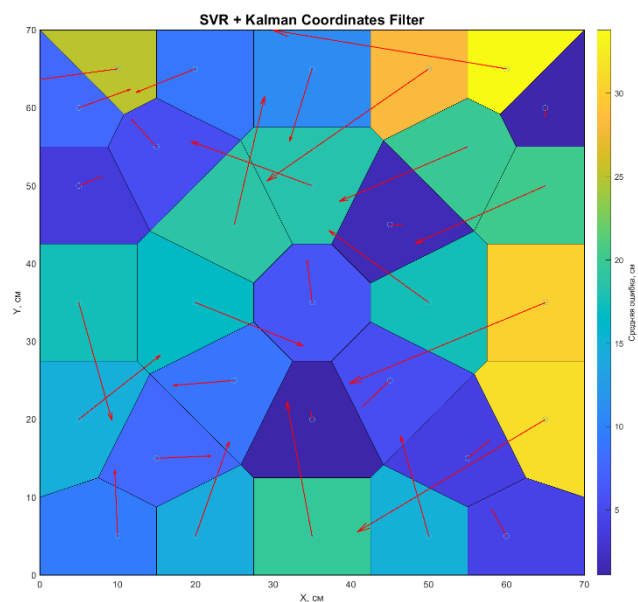


(а) – без фильтра Калмана для координат; (б) – с фильтром Калмана

Рисунок 39 – Карта ошибок позиционирования методом роя частиц (Particle Swam)

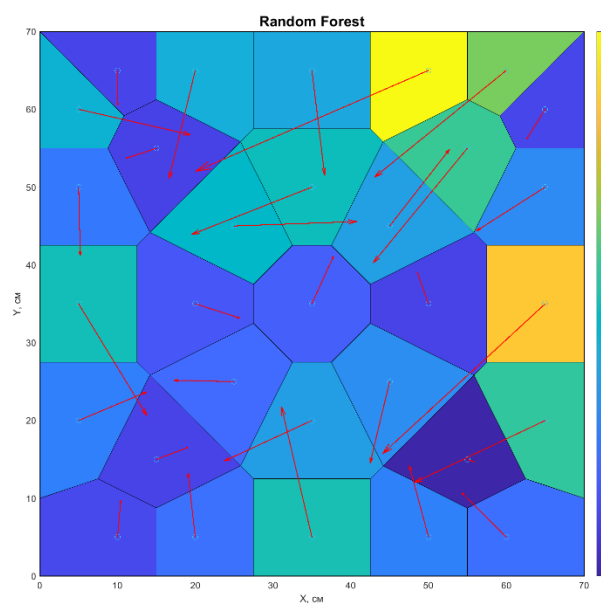


(a)

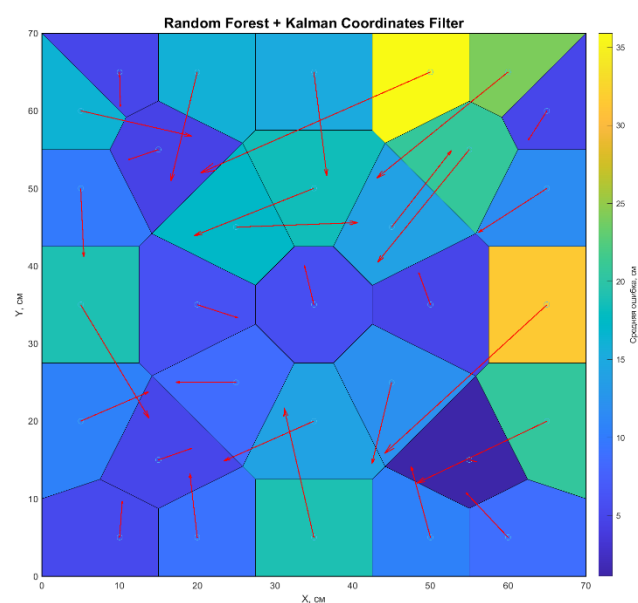


(б)

(a) – без фильтра Калмана для координат; (б) – с фильтром Калмана
Рисунок 40 – Карта ошибок позиционирования моделью, обученной методом опорных векторов (SVR)

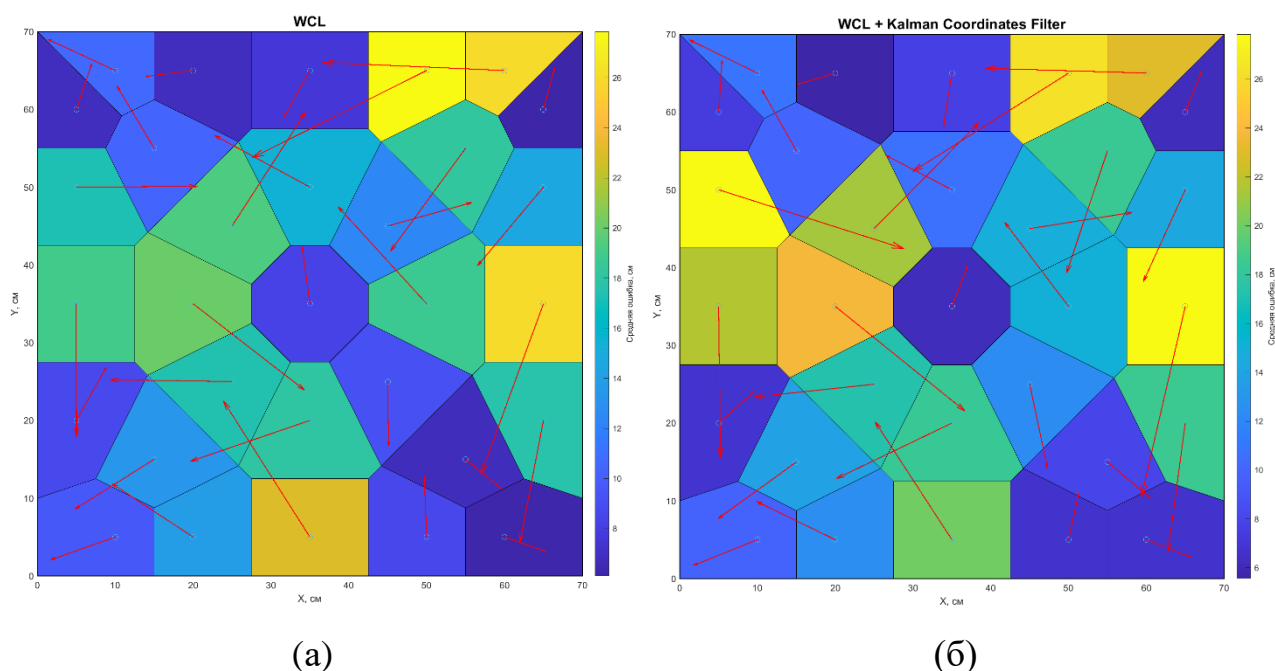


(a)



(б)

(a) – без фильтра Калмана для координат; (б) – с фильтром Калмана
Рисунок 41 – Карта ошибок позиционирования моделью, обученной методом случайного леса (RF)



(a) – без фильтра Калмана для координат; (б) – с фильтром Калмана

Рисунок 42 – Карта ошибок позиционирования методом WCL

Из проведённого исследования можно сделать вывод, что наилучшим методом оценки позиции является метод с использованием модели, обученной методом случайного леса, с фильтрацией рассчитанных координат фильтром Калмана. Данный подход даёт наименьшую ошибку позиционирования и дисперсию ошибки.

Также можно заметить, что в верхнем правом углу поля наблюдается наибольшая ошибка измерения для последних трёх методов. Это ошибка объясняется тем, что БС, расположенная в той области, была случайным образом сдвинута относительно её положения, когда производится сбор данных для обучения моделей.

4.1.2 Сравнение разработанной системы с аналогами

В данной работе были рассмотрены существующие аналоги: Navigine, Cisco Hyperlocation и RealTrac. Выберем среди вариации продуктов производителей те, которые наиболее близки к задачам разрабатываемой системы. Точность позиционирования рассмотрим сравнительную таблицу, в

которой представлены заявленная производителем точность и точность разработанной системы. Так как разработанная система опробована только на стенде, то будет корректно сравнивать системы по ошибке позиционирования относительной площади покрытия γ , которую будем вычислять как отношение квадрата средней ошибки $\bar{\varepsilon}^2$ к площади покрытия S .

$$\gamma = \frac{\bar{\varepsilon}^2}{S}, \quad (63)$$

Сравнение систем представлено в таблице 13.

Таблица 13 – Сравнение точности систем позиционирования

Система позиционирования	Navigine [46]	RealTrac [47]	Cisco Hyperlocation [48]	Разработанная система
Ошибка позиционирования	(1-10) м	(1-5) м	1 м	13.15 см
Рабочая зона	-	10 м ²	50 м ²	4900 см ²
Ошибка относительно площадь покрытия, γ	-	(0.1-2.5)	0.02	0.037

Как видно из таблицы разработанная система по уступает в точности системе Cisco Hyperlocation, однако оказывается лучше системы RealTrac. Данное сравнение не совсем корректно, так для справедливого сравнения необходимо провести тестирование в условиях приближенных к реальным. Однако на текущий момент это невозможно, так как в сети БС используются микроконтроллеры с малой зоной покрытия. Также стоит учесть, что систем позиционирования, использующих только Bluetooth нет. Поэтому применение сторонних источников, на основе которых можно определить позицию, является недостатком разрабатываемой системы.

Помимо прочности разработанная система имеет следующие преимущества по сравнению с рассмотренными аналогами:

1. хранение данных на локальном сервере. Эта важная особенность, которая гарантирует безопасность собираемых данных, а также данных пользователей. Продукт Navigine данному параметру не удовлетворяет, так как данная система осуществляет отправку данных о местоположении на сервера компании-производителя.

2. открытый код. Доступность и открытость кода является важным параметром как для разработчиков системы, так и для потребителей. Сторонние разработчики способны делать вклад в развитие системы;

3. масштабируемость. Существующий код написан по правилам чистой архитектуры, что позволяет с минимальными затратами времени и усилий вносить в код модификации и добавлять новый функционал.

Помимо рассмотренных преимуществ разработанной системы относительно существующих аналогов, важно рассмотреть недостатки системы:

1. использование только Bluetooth в качестве источника данных о позиции;

2. использования станций с малой зоной покрытия;

3. отсутствие возможности интегрирования приложения со сторонними приложениями;

4. отсутствие дополнительного функционала помимо слежения за позицией.

Будущие разработки системы будут в основном касаться описанных недостатков для повышения качества и конкурентоспособности системы.

После решения проблемы точности позиционирования и обеспечения дополнительного функционала, разрабатываемая система будет превосходить существующие аналоги, рассмотренные в данной работе. Следовательно, предприятиями и организациям, желающим использовать на своей территории системы локального позиционирования, рекомендуется использовать разработанную в данной работе систему.

5 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение

5.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения научных исследований с позиции ресурсоэффективности

5.1.1 Потенциальные потребители результатов исследований

Потенциальными потребителями результатов исследования является организации производственные и перерабатывающей промышленности, логистики и складирования, оказания медицинских услуг, а также социальных и культурных объектов. Для данных предприятий разрабатывается система локального позиционирования по Bluetooth. Однако существующие решения могут создавать конкуренцию. Поэтому проведём сегментирование рынка систем локального позиционирования по размеру компаний потребителей и по области применения для того, чтобы выбрать сегмент, на который стоит направить максимальные усилия по разработке. Компаниями-конкурентами в области производства систем позиционирования являются: RealTrac Technologies, ООО «Навигационные решения» и Сиско Текнолоджи, Инк. Результат представлен в таблице 14.

Таблица 14 – Карта сегментирования рынка

		Область применения				
		Социальные объекты	Культурные объекты	Транспорт и складирование	Производство и переработка	Добыча полезных ископаемых
Размер компании	Мелкие				R	
	Средние	N, C	N	R	R	R
	Крупные	C	N	R	R, C	R

где R – ООО «RealTrac Technologies»;

N – ООО «Навигационные решения»;

C – Сиско Текнолоджи, Инк.

Исходя из результатов сегментирования рынка делаем вывод, что наиболее перспективными сегментами рынка являются мелкие социальные культурные транспортные и складские предприятия.

5.1.2 Анализ конкурентных технических решений

Оценим сильные и слабые стороны конкурентов с помощью анализа конкурентных технических решений в виде оценочной карты. Для анализа приведём продукты рассмотренных выше конкурентов: ReacTrac от компании ООО «RealTrac Technologies», Navigine от ООО «Навигационные решения» и Cisco Hyperlocation от Сиско Текнолоджи, Инк. Оценочная карта представлена в таблице 15. Максимальные и минимальные возможные оценки при анализе равны 5 и 1 соответственно.

Таблица 15 – Оценочная карта

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы				Конкурентоспособность			
		Разрабатываемая система	Navigine	RealTrac	Cisco Hyperlocation	Разрабатываемая система	Navigine	RealTrac	Cisco Hyperlocation
Технические критерии оценки ресурсоэффективности									
Безопасность	0.06	3	3	4	3	0.18	0.18	0.24	0.18
Простота	0.1	5	4	3	2	0.50	0.40	0.30	0.20
Встраиваемость	0.12	5	5	2	3	0.60	0.60	0.24	0.36
Использование сторонних радиоустройств	0.1	5	4	1	1	0.50	0.40	0.10	0.10
Точность	0.08	3	3	5	3	0.24	0.24	0.40	0.24
Дополнение WiFi и др.	0.04	1	3	5	1	0.04	0.12	0.20	0.04
Экономические критерии оценки ресурсоэффективности									
Конкурентоспособность	0.08	4	5	5	2	0.32	0.40	0.40	0.16
Уровень проникновения на рынок	0.11	3	3	4	1	0.33	0.33	0.44	0.11
Цена	0.12	5	4	2	3	0.60	0.48	0.24	0.36
Предполагаемый срок эксплуатации	0.10	5	4	4	4	0.50	0.40	0.40	0.40
Послепродажное обслуживание	0.09	5	4	5	5	0.45	0.36	0.45	0.45
Итого	1	44	42	40	28	4.26	3.91	3.41	2.60

По построенной оценочной карте сделаем вывод, что разрабатываемая система локального позиционирования по Bluetooth является наиболее эффективной. Она превосходит конкурентов в простоте использования, цене и сроке эксплуатации. Однако в плане дополнительных средств оценки позиции, уровню проникновения на рынок, безопасности и точности разрабатываемая система требует доработки.

5.1.3 SWOT-анализ

SWOT-анализ позволяет выявить и структурировать сильные и слабые стороны фирмы, а также потенциальные возможности и угрозы. Достигается это за счет того, что менеджеры сравнивают внутренние силы и слабости своей компании с возможностями, которые дает им рынок [49].

Приведём SWOT-анализ проекта для того, чтобы дать чёткое представление о проекте, указать в каких направлениях нужно действовать, используя сильные стороны, чтобы максимизировать возможности и свести к минимуму угрозы и слабости, определить направление развития проекта.

Для начала составим SWOT-матрицу (таблица 16)

Таблица 16 – SWOT-матрица

<p>Сильные стороны:</p> <p>С1. Низкая стоимость;</p> <p>С2. Простота использования;</p> <p>С3. Использование внешних устройств;</p> <p>С4. Встраиваемость;</p> <p>С5. Энергоэкономичность;</p> <p>С6. Открытый исходный код.</p>	<p>Слабые стороны:</p> <p>Сл1. Ограниченное бюджетное финансирование;</p> <p>Сл2. Слабая материально-техническая база;</p> <p>Сл3. Отсутствие дополнительных источников оценки позиции;</p> <p>Сл4. Безопасность;</p> <p>Сл5. Недостаток разработчиков</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Рост спроса на исследование поведения пользователей;</p> <p>В2. Привлечение сторонних разработчиков;</p> <p>В3. Сбор средств на разработку в качестве стартапа;</p> <p>В4. Повышение стоимости конкурентных разработок.</p> <p>В5. Рост спроса пользователей мобильных устройств на сервисы повышения комфорта навигации.</p>	<p>Угрозы:</p> <p>У1. Нестабильная экономическая ситуация;</p> <p>У2. Расширение предложения конкурентов;</p> <p>У3. Конкуренция на привлечение средств инвесторов;</p> <p>У4. Появление более эффективных технологических решений;</p> <p>У5. Снижение популярности Bluetooth технологии.</p>

Следующим шагом приведём соответствие слабые и сильные стороны разрабатываемой системы условиям окружающей среды. Интерактивные матрицы представлены в таблицах (17-20). Далее можно составить итоговую матрицу SWOT-анализа (таблица 21).

Таблица 17 – Интерактивная матрица сильных сторон и возможностей проекта

		Сильные стороны					
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
Возможности	B1	0	+	+	+	+	-
	B2	-	-	+	+	-	+
	B3	+	0	+	+	-	+
	B4	+	+	-	-	+	-
	B5	+	+	0	+	+	-

Таблица 18 – Интерактивная матрица слабых сторон и возможностей проекта

		Слабые стороны				
		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
Возможности	B1	-	-	+	+	+
	B2	+	+	+	-	+
	B3	+	+	-	-	+
	B4	0	0	+	+	0
	B5	-	-	+	+	-

Таблица 19 – Интерактивная матрица сильных сторон и угроз проекта

		Сильные стороны					
		C1	C2	C3	C4	C5	C6
Угрозы	У1	+	-	0	-	-	-
	У2	+	+	+	+	+	+
	У3	+	-	0	-	-	-
	У4	+	-	+	-	+	-
	У5	+	+	+	+	+	-

Таблица 20 – Интерактивная матрица слабых сторон и угроз проекта

		Слабые стороны				
		Сл1	Сл2	Сл3	Сл4	Сл5
Угрозы	У1	+	+	-	-	+
	У2	+	+	+	+	-
	У3	-	+	+	+	0
	У4	-	+	+	-	+
	У5	-	+	+	-	+

Таблица 21 – SWOT-анализ проекта

	<p>Сильные стороны:</p> <p>С1. Низкая стоимость;</p> <p>С2. Простота использования;</p> <p>С3. Использование внешних устройств;</p> <p>С4. Встраиваемость;</p> <p>С5. Энергоэкономичность;</p> <p>С6. Открытый исходный код.</p>	<p>Слабые стороны:</p> <p>Сл1. Ограниченное бюджетное финансирование;</p> <p>Сл2. Слабая материально-техническая база;</p> <p>Сл3. Отсутствие дополнительных источников оценки позиции;</p> <p>Сл4. Безопасность;</p> <p>Сл5. Недостаток разработчиков.</p>
<p>Возможности:</p> <p>В1. Рост спроса на исследование поведения пользователей;</p> <p>В2. Привлечение сторонних разработчиков;</p> <p>В3. Сбор средств на разработку в качестве стартапа;</p> <p>В4. Повышение стоимости конкурентных разработок;</p> <p>В5. Рост спроса пользователей мобильных устройств на сервисы повышения комфорта навигации.</p>	<ul style="list-style-type: none"> Повысить качество системы (простоту использования, поддержку сторонних устройств, встраиваемость, энергоэкономичность) будет возможно при высоком спросе и при привлечении средств инвесторов; Благодаря открытости кода сторонние разработчики могут участвовать в улучшении системы; Низкая стоимость повышает спрос при растущей стоимости конкурентных разработок. 	<ul style="list-style-type: none"> Ограниченное бюджетное финансирование и слабая материально=техническая база решаются привлечением средств инвесторов при создании стартапа; Повышение безопасности системы и внедрение дополнительных источников оценки позиции возможно при привлечении сторонних разработчиков и привлечении на это дополнительных средств; Недостаток разработчиков решается их привлечением через открытые разработки и при найме на дополнительно привлечённые средства.

Продолжение таблицы 21 – SWOT-анализ проекта

<p>Угрозы:</p> <p>У1. Нестабильная экономическая ситуация;</p> <p>У2. Расширение предложения конкурентов;</p> <p>У3. Конкуренция на привлечение средств инвесторов;</p> <p>У4. Появление более эффективных технологических решений;</p> <p>У5. Снижение популярности Bluetooth технологии.</p>	<ul style="list-style-type: none"> • При расширении предложения конкурентов или появлении более эффективных технологических решений необходимо делать акцент на низкой стоимости и простоте использования, а также на открытости исходного кода; • Для повышения конкурентоспособности разработки при привлечении дополнительных средств необходимо представлять наиболее сильные стороны проекта; • При нестабильной экономической обстановке использование сторонних устройств помогает выбрать наиболее дешёвые радиоустройства; 	<ul style="list-style-type: none"> • При снижении популярности Bluetooth, появлении более эффективных технологических решений и невозможности применения других источников оценки позиции необходимо привлекать дополнительных разработчиков и финансирование для повышения вариантов используемых технологий; • Необходимо искать различные источники финансирования при высокой конкуренции на средства инвесторов, например, гранты или краудфандинг; • При появлении новых конкурентных решений необходимо решать проблемы безопасности и отсутствии дополнительных источников оценки позиции для совершенствования системы и повышения её конкурентоспособности.
--	--	--

5.2 Планирование научно-исследовательских работ

5.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Планирование – это процесс подготовки управленческого решения, основанный на обработке исходной информации и включающий в себя выбор целей, определение средств и путей их достижения посредством сравнительной оценки альтернативных вариантов и принятия наиболее реального из них в ожидаемых условиях развития [50].

Разработаем план проекта с помощью планирования, таким образом определив все действия, необходимые для осуществления проекта. План проекта необходим для координации деятельности всех участников проекта. Он описывает, что, кто, как и когда будет делать. Необходимо определить действия,

и ответственных за их выполнение. Для каждой операции необходимо определить ресурсы для их выполнения.

Составим таблицу, отражающую работы, необходимые к выполнению, и распределение исполнителей по данным видам работ. Результат приведён в таблице 22.

Таблица 22 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ раб	Содержание работ	Исполнитель
Разработка технического задания	1	Составление и утверждение технического задания	Р
Выбор направления исследования	2	Обзор научно-технической литературы	Р, С
	3	Календарное планирование работ	С
Технические и экспериментальные исследования	4	Изготовление физического макета системы локального позиционирования	Р, С
	5	Исследование зависимости расстояния от силы сигнала	С
	6	Написание программного обеспечения	С
	7	Тестирование программного обеспечения	С
	8	Подбор параметров системы локального позиционирования	Р, С
	9	Измерение точности позиционирования	С
Оформление отчета по НИР	10	Написание пояснительной записки	С

где Р – руководитель;
С – студент.

5.2.2 Разработка графика проведения научного исследования

Имея календарное расписание проекта и очередность выполнения задач, не требуется тратить усилия на выбор самой важной и приоритетной задачи каждый раз, когда это необходимо. Это экономит усилия на принятие решений [51].

Трудоемкость выполнения научного исследования оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер. Для определения ожидаемого (среднего) значения трудоемкости используется следующая формула:

$$t_{ожі} = \frac{3t_{mini} + 2t_{maxi}}{5}, \quad (64)$$

где $t_{ожі}$ – ожидаемая трудоемкость выполнения i -ой работы, чел.-дн.;

t_{mini} – минимальная трудоемкость выполнения i -ой работы, чел.-дн.;

t_{maxi} – максимальная трудоемкость выполнения i -ой работы, чел.-дн.

Исходя из расчета ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях:

$$T_{pi} = \frac{t_{ожі}}{Ч_i}, \quad (65)$$

где T_{pi} – продолжительность одной работы, раб. дн.;

$Ч_i$ – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном этапе, чел.

Для удобства построения графика, необходимо длительность каждого этапа работ из рабочих дней перевести в календарные дни. Поэтому необходимо воспользоваться данной формулой:

$$T_{ki} = T_{pi} \cdot k_{кал}, \quad (66)$$

где T_{ki} – продолжительность выполнения i -й работы в календарных днях.

Коэффициент календарности определяется по следующей формуле:

$$k_{кал} = \frac{T_{кал}}{T_{кал} - T_{вых} - T_{пр}}, \quad (67)$$

где $T_{кал}$ – календарные дни;

$T_{\text{вых}}$ – выходные дни;

$T_{\text{пр}}$ – праздничные дни.

Количество праздничных дней определяется согласно Трудовому кодексу РФ. Согласно статье 112 ТК РФ [52] в России официально установлено 14 нерабочих дней. Количество выходных и календарных дней, т.е. $T_{\text{вых}} + T_{\text{пр}}$, можно узнать из производственного календаря, размещённом на официальном сайте государственной думы РФ [53]. Из производственного календаря берём $T_{\text{вых}} + T_{\text{пр}} = 118$ дней. Следовательно календарный коэффициент равен

$$k_{\text{кал}} = \frac{T_{\text{кал}}}{T_{\text{кал}} - (T_{\text{вых}} + T_{\text{пр}})} = \frac{365}{365 - 118} = 1.48. \quad (68)$$

Рассчитаем все значения и представим их в таблице 23.

Таблица 23 – Временные показатели проведенных работ

№ раб	Трудоемкость работ			Ч, чел.	T_{pi} , раб. дн.	T_{ki} , раб. дн.
	t_{min} , чел.-дн.	t_{max} , чел.-дн.	$t_{ож}$, чел.-дн.			
1	1	2	1.4	1	1.4	2
2	5	11	7.4	2	3.7	5
3	1	2	1.4	1	1.4	2
4	7	10	8.2	2	4.1	6
5	4	7	5.2	1	5.2	8
6	23	33	27	1	27	40
7	7	12	9	1	9	13
8	6	10	7.6	2	3.8	6
9	4	8	5.6	1	5.6	8
10	4	7	5.2	1	5.2	8
Итого						98

Исходя из временных показателей проведенных работ построим диаграмму Ганта, представленный в таблице 24.

Таблица 24 – Диаграмма Ганта



5.3 Бюджет научного исследования (НТИ)

Бюджетирование проекта – это искусство разработки и управления бюджетом, который покрывает все понесенные расходы и сохраняет устойчивость проекта в долгосрочной перспективе. Подготовка бюджета – это один из процессов управления проектами, который призван обеспечить разработку, обоснование и готовность к использованию экономически эффективным образом [54].

Для данного проекта рассчитаем затраты разделив их на затраты по экономическим элементам:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ;
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды;
- накладные расходы.

5.3.1 Расчет материальных затрат НТИ

Расчет материальных затрат Z_m осуществляется по следующей формуле:

$$Z_m = (1 + k_T) \cdot \sum_i^m C_i \cdot N_{расхi}. \quad (69)$$

где m – количество видов материальных ресурсов, потребляемых при выполнении проекта;

$N_{расхi}$ – количество материальных ресурсов i -го вида, планируемых к использованию в проекте;

C_i – цена приобретения единицы i -го вида потребляемых ресурсов;

k_T – коэффициент, учитывающий транспортно-заготовительные расходы, примем равным 20%.

Все пункты материальных затрат и связанные с ними расчёты приведены в таблице 25.

Таблица 25 – Материальные затраты

Наименование	Единица измерения	Кол-во	Цена за ед., руб	Затраты на материалы, руб
Микроконтроллеры ESP32	шт.	5	293 [55]	1758
Провод МГШВ 1x0.12 мм ²	м	5	9 [56]	54
Шнур интерфейсный гн.-шт. USB AF / USB micro M	шт.	5	105 [57]	630
Плита пенополистирольная ППС-9-Р-А 100x100x3см	шт.	1	73 [58]	87.6
Хомут (стяжка) 3.6 мм/292 мм, нейлон	шт.	10	3 [59]	36
Многофункциональный концентратор USB2.0/3.1 x 6	шт.	1	550 [60]	660
Итого				3225.6

5.3.2 Расчет затрат на специальное оборудование для научных (экспериментальных) работ

Для проведения научных исследований необходимо специальное оборудование. Затраты на специальное оборудование $Z_{\text{спец}}$ рассчитаны и приведены в таблице 26.

Таблица 26 – Расчет бюджета затрат на приобретение спецоборудования для научных работ

Наименование	Кол-во	Цена единицы оборудования, тыс. руб.	Общая стоимость оборудования, тыс. руб
Ноутбук	1	20 [61]	20
Мультиметр	1	3 [62]	3
Паяльная станция	1	8 [63]	8
Итого			31

5.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

Основная заработная плата работника $Z_{\text{осн}}$ рассчитывается по следующей формуле:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} \cdot T_{\text{раб}}, \quad (70)$$

где $Z_{\text{осн}}$ – основная заработная плата одного работника;

$T_{\text{раб}}$ – продолжительность работ, выполняемых научно-техническим работником, раб. дн.

$Z_{\text{дн}}$ – среднедневная заработная плата работника, руб.

Определить $T_{\text{раб}}$ для каждого из сотрудников можно по таблицам 22 и 23

Среднедневная заработная плата $Z_{\text{дн}}$ рассчитывается по формуле:

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} \cdot M}{F_{\text{д}}}, \quad (71)$$

где $Z_{\text{м}}$ – месячный должностной оклад работника, руб.;

M – количество месяцев работы без отпуска в течение года;

F_d – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дн.

Для 5 дневной рабочей недели 24 раб. дня отпуска и $M = 11.2$ месяца.

Для 6 дневной рабочей недели 48 раб. дня отпуска и $M = 10.4$ месяца.

Баланс рабочего времени представлен в таблице 27.

Таблица 27 – Баланс рабочего времени

Показатели рабочего времени	Руководитель	Студент
Календарное число дней	365	365
Количество нерабочих дней [53]	118	118
Потери рабочего времени	48	24
Действительный годовой фонд рабочего времени	199	223

Месячный оклад работника $З_m$ рассчитывается по формуле:

$$З_m = З_{тс} \cdot (1 + k_{пр} + k_d) \cdot k_p, \quad (72)$$

где $З_{тс}$ – заработная плата по тарифной ставке, руб.;

$k_{пр}$ – премиальный коэффициент;

k_d – коэффициент доплат и надбавок;

k_p – районный коэффициент.

С учётом приказа «Об установлении размера должностных окладов по отдельным профессиональным квалификационным группам» [64], ассистент преподаватель без степени, работающий в ТПУ, имеет оклад равный 22700 руб. Инженер-исследователь – 16140 руб.

Известно, что для города Томска районный коэффициент k_p равен 1.3. Коэффициент доплат и надбавок k_d равен 0.2. Премиальный коэффициент $k_{пр}$ равен 0.3.

Расчет основной заработной платы представлен в таблице 28.

Таблица 28 – Основная заработная плата

Исполнители	$Z_{\text{тс}}$, руб.	$Z_{\text{м}}$, руб.	$Z_{\text{дн}}$ руб.	$T_{\text{раб}}$, дн.	$Z_{\text{осн}}$, руб.
Руководитель	22700	44265	2313.35	19	43953.59
Студент	16140	31473	1580.71	96	151747.85
Итого					195701.44

5.3.4 Дополнительная заработная плата

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций.

Расчет дополнительной заработной платы $Z_{\text{доп}}$ производится по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} \cdot Z_{\text{осн}} = 23484.17, \quad (73)$$

где $k_{\text{доп}}$ – коэффициент дополнительной заработной платы, равный 0.12.

5.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

Обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам осуществляются органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

Величина отчислений во внебюджетные фонды $Z_{\text{внеб}}$ определяется следующей формулой:

$$Z_{\text{внеб}} = k_{\text{внеб}} \cdot (Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}}), \quad (74)$$

где $k_{\text{внеб}}$ – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды.

Согласно ст. 427 п.2.1 Налогового кодекса РФ для бюджетным научным учреждениям и автономным научным учреждениям либо образовательным организациям высшего образования, являющимся бюджетными учреждениями, автономными учреждениями введена пониженная ставка 29.8% [65].

Отчисления во внебюджетные фонды представлены в таблице 29.

Таблица 29 – Отчисления во внебюджетные фонды

Исполнитель	Руководитель	Студент
Основная заработная плата, руб.	43953.59	151747.85
Дополнительная заработная плата, руб.	5274.43	18209.74
Коэффициент отчисления во внебюджетные фонды, %	29.8	29.8
Отчисления во внебюджетные фонды, руб.	14669.95	50647.36
Итого	65317.31 руб	

5.3.6 Накладные расходы

Накладные расходы учитывают прочие затраты организации, не попавшие в предыдущие статьи расходов: печать и ксерокопирование материалов исследования. оплата услуг связи. электроэнергии. почтовые и телеграфные расходы. размножение материалов и т.д.

Накладные расходы рассчитываются по формуле:

$$\begin{aligned}
 Z_{\text{накл}} &= k_{\text{накл}} \cdot (Z_{\text{м}} + Z_{\text{спец}} + Z_{\text{осн}} + Z_{\text{доп}} + Z_{\text{внеб}}) = \\
 &= 50996.56 \text{ руб},
 \end{aligned}
 \tag{75}$$

где $k_{\text{накл}}$ – коэффициент, учитывающий накладные расходы, равный 0.16.

5.3.7 Формирование бюджета затрат научно-исследовательского проекта

Рассчитаем величину затрат научно-исследовательской работы для формирования бюджета затрат проекта. Определение бюджета затрат на выполнение проекта по созданию системы локального позиционирования по Bluetooth приведено в таблице 30.

Таблица 30 – Расчет бюджета затрат

Наименование статьи	Сумма, руб.
1. Материальные затраты	3225.6
2. Затраты на специальное оборудование	31000
3. Затраты по основной заработной плате исполнителей проекта	195701.44
4. Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей проекта	23484.17
5. Отчисления во внебюджетные фонды	65317.31
6. Накладные расходы	50996.56
Бюджет затрат НТИ	369725.08

5.4 Определение ресурсной, финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Для того, чтобы оценить соответствие затрат и результатов разработки системы локального позиционирования по Bluetooth интересам и целям участников, а также потенциальным инвесторам и потребителям, проведём анализ эффективности проекта.

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный финансовый показатель разработки $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$ определяется как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}, \quad (76)$$

где Φ_{pi} – стоимость варианта исполнения;

Φ_{max} – максимальная стоимость исполнения научно-исследовательского проекта, принятая 1 млн. руб.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов исполнения объекта исследования I_{pi} можно определить следующим образом:

$$I_{pi} = \sum_i a_i \cdot b_i, \quad (77)$$

где a_i – весовой коэффициент варианта исполнения разработки;

b_i – бальная оценка варианта исполнения разработки.

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки $I_{\text{исп.}i}$ определяется на основании интегрального показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{исп.}i} = \frac{I_{pi}}{I_{\text{финр.}i}}, \quad (78)$$

Сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки позволит определить сравнительную эффективность проекта и выбрать наиболее целесообразный вариант из предложенных. Сравнительная эффективность проекта $\mathcal{E}_{\text{ср}}$ рассчитывается как:

$$\mathcal{E}_{\text{ср}} = \frac{I_{\text{исп.}1}}{I_{\text{исп.}2}}, \quad (79)$$

В качестве вариантов исполнения разработки возьмем текущий проект, а также рассмотренные ранее аналоги Navigine, RealTrac и Cisco Hyperlocation. Проведем сравнительную характеристику в таблице 31. Максимальные и минимальные возможные оценки при сравнительной оценке равны 5 и 1 соответственно.

Таблица 31 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Объект исследования				
	Весовой коэффициент	Текущий проект	Navigine	RealTrac	Cisco Hyperlocation
Безопасность	0.15	3.00	3	4	3
Устойчивость к отказам	0.15	4.00	4	5	3
Точность	0.08	3.00	3	5	3
Энергосбережение	0.08	5.00	5	4	3

Продолжение таблицы 31 – Сравнительная оценка характеристик вариантов исполнения проекта

Критерии	Объект исследования				
	Весовой коэффициент	Текущий проект	Navigine	RealTrac	Cisco Hyperlocation
Встраиваемость	0.23	5.00	5	2	3
Простота использования	0.23	5.00	4	3	2
Встраиваемость	0.23	5.00	5	2	3
Открытость исходного кода	0.08	5.00	4	1	2
Итого без весовых коэффициентов		30	28	24	19
Итого с весовыми коэффициентами		4.39	4.08	3.3	2.69

На основании полученных показателей выполним сравнение интегрального показателя эффективности вариантов исполнения разработки в таблице 32.

Таблица 32 – Сравнительная эффективность разработки

Показатели	Текущий проект	Navigine	RealTrac	Cisco Hyperlocation
Интегральный финансовый показатель разработки	0.37	0.41	0.75	0.47
Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4.39	4.08	3.3	2.69
Интегральный показатель эффективности	11.86	9.95	5.08	5.72
Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0.84	0.43	0.48

Проведя расчёты, мы наблюдаем, что устройство PillReminder более всех из сравниваемых систем соответствует всем указанным требованиям, удовлетворяя интересам потребителей, производителей и разработчиков, а также потенциальных инвесторов. Проект имеет такую высокую оценку эффективности, потому что в основе его разработки изначально закладывалась идея максимальной простоты конструкции, удобства использования и эффективности работы, а также экономичности и перспективности разработки.

6 Социальная ответственность

В ходе данной работы была спроектирована модель системы локального позиционирования по Bluetooth. Данная модель является образцом, которая способна определять позицию объекта на площади меньше 1 м², поэтому вне рабочей аудитории она не имеет применимости. Рабочей аудиторией является аудитория 101 корпуса №10 ТПУ. Будущим местом применения улучшенной системы могут являться общественные, социальные, коммерческие и промышленные объекты различной направленности. Разрабатываемая система в обозримом будущем не предполагается к использованию на территории военных объектов, а также объектов, использующих атомную энергию, объектов строительства и других опасных производственных объектов, указанных в федеральном законе «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» [66].

Для разработки и эксплуатации данной системы требуется персональный компьютер (ПК) с организованным рабочем местом пользователя. Также при разработке использовались паяльные инструменты и сопутствующие расходные материалы.

6.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности

Согласно ТК РФ, N 197-ФЗ [52] работник аудитории 101, корпуса №10 ТПУ имеет право на:

- рабочее место, соответствующее требованиям охраны труда;
- обязательное социальное страхование от несчастных случаев на производстве и профессиональных заболеваний в соответствии с федеральным законом;
- отказ от выполнения работ в случае возникновения опасности для его жизни и здоровья вследствие нарушения требований охраны труда, за исключением случаев, предусмотренных федеральными законами, до устранения такой опасности;

- обеспечение средствами индивидуальной и коллективной защиты в соответствии с требованиями охраны труда за счет средств работодателя;
- внеочередной медицинский осмотр в соответствии с медицинскими рекомендациями с сохранением за ним места работы (должности) и среднего заработка во время прохождения указанного медицинского осмотра.

Продолжительность и особенности режима рабочего времени и времени отдыха работников определяются Трудовым кодексом Российской Федерации. Для работников лаборатории устанавливается шестидневный рабочий день.

В соответствии с техническим регламентом о требованиях пожарной безопасности [67] каждому работнику выдаются средства индивидуальной защиты. Согласно ГОСТ Р ИСО 11611-2011 [68] при пайке необходимо использовать средства индивидуальной защиты класса 1. Для исключения возможности несчастных случаев должны проводиться обучение, инструктажи и проверка знаний работников требований безопасности труда, как это указано в техническом регламенте о безопасности средств индивидуальной защиты [69].

Основные виды работ с системой позиционирования производятся посредством работы на персональном компьютере. Средствами отображения информации является монитор ПК, а часто используемые органы управления — это мышь и клавиатура. Рабочее место оборудуется в соответствии с санитарно-эпидемиологические требованиями к условиям труда требованиями [70], ГОСТ 12.2.032-78 [71] и ГОСТ 21889-76 [72]. Оно должно занимать площадь не менее 6 м², высота помещения должна быть не менее 4.5 м, а объем - не менее 20 м³ на одного человека. Высота над уровнем пола рабочей поверхности, за которой работает оператор, должна составлять 725 мм. Оптимальные размеры поверхности стола 1600 x 1000 кв. мм. Под столом должно иметься пространство для ног с размерами по глубине 650 мм. Рабочий стол должен также иметь подставку для ног, расположенную под углом 15° к поверхности стола. Рабочий стол должен быть устойчивым, иметь однотонное неметаллическое покрытие. Кресло оператора должно иметь регулировку высоты поверхности сиденья и угла наклона спинки.

6.2 Производственная безопасность

В данном пункте анализируются вредные и опасные факторы, которые могут возникать при проведении разработки, производстве и эксплуатации системы локального позиционирования по Bluetooth в аудитории 101 корпуса №10 ТПУ. Для поиска таковых был использован рекомендованный нормативный документ ГОСТ 12.0.003-2015 [73], после изучения которого была составлена таблица 33. В таблице ниже представлено сопоставление выявленных производственных факторов и соответствующих им нормативных документов. Для каждого из этапов работ были указаны факторы, наличие которых угрожает жизни и здоровью работников.

Таблица 33 – Опасные и вредные факторы при выполнении работ по созданию системы локального позиционирования по Bluetooth

Факторы (ГОСТ 12.0.003-2015)	Этапы работ			Нормативные документы
	Разработка	Производство	Эксплуатация	
Поражение электрическим током	+	+	+	ГОСТ 12.1.019-2017
Повышенный уровень ЭМП	+	+	+	ГОСТ 12.1.045-84.
Недостаточная освещённость	+	+	+	СанПиН 1.2.3685-21
Отсутствие или недостаток естественного света	+	+	+	СП 52.13330.2016
Отклонение показателей микроклимата	+	+	+	СанПиН 2.2.4.548-96
Опасные химические вещества	+	+	-	ГОСТ 12.1.007-76
Повышенный уровень шума	-	+	+	ГОСТ 12.1.003-83

6.2.1 Поражение электрическим током

Поражение электрическим током возможно при контакте с силовыми цепями устройства. Поражение электрическим током является наиболее опасным из всех видов вредного воздействия. Проходя через организм человека,

электрический ток производит термическое, электролитическое и биологическое действие.

Для предотвращения поражения электрическим током помещение, где размещается рабочее место и разрабатываемое устройство, должно быть оборудовано защитным заземлением в соответствии с техническими требованиями по эксплуатации. Основными техническими средствами защиты, являются защитное заземление, как указывалось ранее, автоматическое отключение питания, устройства защитного отключения, изолирующие электрозащитные средства, знаки и плакаты безопасности. Перед началом работы на стенде необходимо изучить правила электробезопасности, которые описаны в требованиях к электробезопасности ГОСТ 12.1.019-2017 [74].

6.2.2 Повышенный уровень ЭМП

Повышенная напряжённость электрического поля может возникать в аудитории от работы электронных устройств, таких как мониторы и персональные электронно-вычислительные машины. Также приёмники при обмене информацией по Bluetooth создают электромагнитные возмущения.

Негативное воздействие на человека повышенная напряжённость электростатического поля (ЭСП) выражается в виде торможения рефлексов, изменения головного мозга, нарушения памяти, понижения кровяного давления, замедления сокращений сердца, нарушений в печени и селезенке, помутнения хрусталика глаза. Для того что бы уберечь людей от получения хронических заболеваний при эксплуатации системы существуют временные требования к пребыванию в электрическом поле согласно ГОСТ 12.1.045-84 [75]. Для напряжённости менее 20 кВ/м отсевают какие-либо регламенты. Для предельного значения напряжённости ЭСП $E_{\text{пред}} = 60$ кВ/м допустимое время работы без средств защиты равно одному часу. Для промежуточных значений напряжённости ЭСП время пребывания высчитывается как по методике, приведённой в [75]. Необходимо отслеживать время, проведенное за работой, при необходимости осуществлять перерывы и проветривать помещение.

6.2.3 Недостаточная освещённость и отсутствие или недостаток естественного света

В условиях работы в аудиториях ТПУ, могут возникать проблемы с поступлением естественного света. Воспользуемся СП 52.13330.2016 [76] и СанПиН 1.2.3685-21 [77], чтобы изучить этот вопрос.

Согласно нормам освещенности, недостаточная освещенность рабочей зоны является вредным фактором, который приводит к быстрому утомлению и снижению внимания и работоспособности. Плохое освещение негативно воздействует на зрение, затрудняет длительную работу, вызывает апатию и сонливость. Также растёт уровень травматизма. Средствами нормализации освещенности производственных помещений рабочих мест являются:

- источники света;
- осветительные приборы;
- световые проемы;
- светозащитные устройства;
- светофильтры;
- защитные очки.

В таблице 34 представлены регламентированные допустимые характеристики освещенности рабочих мест в учебных аудиториях в университете.

Таблица 34 – Допустимые характеристики освещенности

Естественное освещение		Совмещенное освещение		Искусственное освещение				
КЕО, %		КЕО, %		Освещенность, лк			Показатель диска форта, М, не более	Коэффициент пульсации освещенности, Кп, не более
				При комбинированном освещении	При общем освещении	При индивидуальном освещении		
При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении	При верхнем или комбинированном освещении	При боковом освещении	Всего	От общего	Индивидуальное		
3,2	1,2	2,1	0,7	-	-	400	40	10

Для того что бы снизить влияние данного фактора на здоровье, необходимо соблюдать допустимое время нахождения перед монитором компьютера и делать перерывы в работе. Помимо этого, возможно использование дополнительных источников света, таких как настольные лампы.

6.2.4 Отклонение показателей микроклимата

На микроклимат в рабочем помещении может влиять температура за окном, нагревательные батареи, вентиляция, а также количество включенной техники в аудитории.

Микроклимат помещения, в котором человек находится долго, играет большую роль в работоспособности, возможности комфортно отдохнуть и расслабиться. Состояние внутренней среды здания может не только плодотворно влиять на здоровье человека, но и оказывать негативное воздействие. Микроклимат любых помещений характеризуется температурой воздуха, его влажностью и скоростью движения

Оптимальные и допустимые величины показателей микроклимата приведены в таблице 35 и таблице 36 соответственно, исходя из требований СанПиН 2.2.4.548-96 [78]. По степени физической тяжести, работы инженера-программиста и пайщика относятся к категории 1а, категории лёгких работ.

Таблица 35 – Оптимальные величины показателей микроклимата

Период года	Категория работ по уровням энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С	Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с
Холодный	1а (до 139)	(22-24)	(21-25)	(60-40)	0.1
Теплый	1а (до 139)	(23-25)	(22-26)	(60-40)	0.1

В целях защиты, работающих от возможного перегрева или охлаждения, при температуре воздуха на рабочих местах выше или ниже допустимых величин, время пребывания на рабочих местах (непрерывно или суммарно за рабочую смену) должно быть ограничено.

Таблица 36 – Допустимые величины показателей микроклимата

Период года	Категория работ по уровням энергозатрат, Вт	Температура воздуха, °С		Температура поверхностей, °С	Относительная влажность воздуха, %	Скорость движения воздуха, м/с	
		Диапазон ниже оптимальных величин	Диапазон выше оптимальных величин			Диапазон температур воздуха ниже оптимальных величин	Диапазон температур воздуха выше оптимальных величин
Холодный	1а (до 139)	(20.0-21.9)	(24.1-25)	(19-26)	(15-75)	0.1	0.1
Теплый	1а (до 139)	(21.0-22.9)	(25.1-26)	(20-29)	(15-75)	0.1	0.2

6.2.5 Опасные химические вещества

При производстве передатчиков для системы локального позиционирования по Bluetooth применяется пайка, процесс которой сопровождается контактом персонала с припоем и флюсом, а также токсичными и раздражающими веществами, выделяющимися при работе с ними. Существует риск контакта кожи и слизистых оболочек с данными веществами.

Согласно ГОСТ 12.1.007-76 [79] существует классификация химических веществ по степени воздействия на организм человека. Выделяют четыре класса опасности:

1. вещества чрезвычайно опасные;
2. вещества высокоопасные;
3. вещества умеренно опасные;
4. вещества малоопасные.

Процессы производства и пайки (лужения) оловянно-свинцовыми припоями могут сопровождаться выделением токсичных веществ, которые относятся к веществам 1-го класса опасности. Растворы и щелочи, попадая на кожу, вызывают сильные ожоги. Согласно ГОСТ 12.1.005 [80] минеральные

кислоты (соляная, азотная, серная и фтористоводородная) и щелочи относятся ко второму классу опасности.

Действие свинца на организм человека заключается в поражении нервной системы, крови, сосудов. Пары кислот и пыль сухих щелочей и оксидов раздражающе действуют на дыхательные пути и слизистую оболочку глаз и носа. Контроль за содержанием вредных веществ в воздухе рабочей зоны должен проводиться в соответствии с ГОСТ 12.1.005 [80] и ГОСТ 12.1.007 [79].

В местах работы с вредными веществами должны быть разработаны нормативно-технические документы по безопасности труда при производстве, применении и хранении вредных веществ, а также выполнены комплексы организационно-технических, санитарно-гигиенических и медико-биологических мероприятий. В рабочем помещении должна присутствовать вентиляция.

6.2.6 Повышенный уровень шума

Одним из важных факторов, влияющих на качество выполняемой работы, является шум. При производстве и эксплуатации системы локального позиционирования по Bluetooth шум может исходить от окружающих людей, работы производственной и транспортной техники и других источников.

Шум ухудшает условия труда, оказывая вредное действие на организм человека. Работающие в условиях длительного шумового воздействия испытывают раздражительность, головные боли, головокружение, снижение памяти, повышенную утомляемость, понижение аппетита, боли в ушах и т. д. Под воздействием шума снижается концентрация внимания, нарушаются физиологические функции, появляется усталость, ухудшается речевая коммутация. Все это снижает работоспособность человека и его производительность, качество и безопасность труда. Предельно допустимые уровни звукового давления представлены в таблице 37, исходя из источника [81].

Таблица 37 – Допустимые уровни звукового давления

Уровни звукового давления, дБ, в октавных полосах со среднегеометрическими частотами, Гц									Уровни звука и эквивалентные уровни звука
31,5	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
86	71	61	54	49	45	42	40	38	50

Распространенные средства индивидуальной защиты от шума – это пробки, наушники, вкладыши (беруши) и шлемы.

Меры коллективной защиты могут включать в себя, в частности:

- оценку риска потери слуха работником;
- использование малошумных машин;
- использование материалов и конструкций, препятствующих распространению шума и вибрации;
- привлечение к работам лиц, не имеющих медицинских противопоказаний по шуму;
- контроль правильности использования средств индивидуальной защиты.

6.3 Экологическая безопасность

В данном разделе рассмотрим характер воздействия проектируемого устройства на окружающую среду и рассмотрим рекомендации по предотвращению воздействий.

На этапах разработки, производства и эксплуатации, а также по завершению срока эксплуатации система локального позиционирования по Bluetooth наносит вред окружающей среде. Это отражается влиянием на оболочки Земли: атмосферу, гидросферу и литосферу.

6.3.1 Атмосфера

При пайке в воздух попадают такие вредные вещества как свинец, ортофосфорная кислота и другие, раздражают слизистые глаза, токсично влияют на дыхательную систему.

Все работы должны проводиться в проветриваемом помещении с соблюдением техники безопасности. Рекомендуется применение бессвинцовой пайки. Для очистки воздуха можно использовать специальные фильтры.

6.3.2 Литосфера

Загрязнение почвы происходит при производстве и утилизации системы. Радиокомпоненты, печатные платы, провода и другие металлические и пластиковые компоненты.

Радиокомпоненты могут быть сданы на переработку и потом вторично использоваться. Печатные платы также сдаются на переработку для разделения на металлы и стеклотекстолит. Металлы в дальнейшем пойдут на переплавку. Стеклотекстолит дробится до состояния порошка, после чего может использоваться для повторного использования в производстве. Процесс переработки пластика включает в себя сбор, сортировку, очистку и непосредственно переработку. Для переработки пластик измельчается в порошок или в хлопья, которые затем, можно переплавить.

6.3.3 Гидросфера

Прямой вред от системы на гидросферу маловероятен. Однако при влажной уборке помещений вредные вещества, осевшие на поверхностях, и моющие химикаты попадают в канализацию и в природные водоёмы.

Для очистки воды необходимо использовать специальные фильтры. Нужно осуществлять раздельных сбор и хранение химических отходов и утилизировать и согласно утверждённым требованиям.

Помимо всех указанных выше пунктов на всех этапах работы с системой потребляется электроэнергия, которая производится на ТЭЦ, ГРЭС, ГЭС, АЭС и других видах электростанций, которые при генерации электроэнергии производят экологически опасные отходы.

6.4 Безопасность в ЧС

При выполнении работ наиболее вероятной ЧС является возникновение пожара в рабочей аудитории. Пожарная безопасность должна обеспечиваться системами предотвращения пожара и противопожарной защиты, в том числе организационно-техническими мероприятиями.

Исходя из установленной номенклатуры обозначений зданий по степени пожарной опасности, анализируемое в данной работе помещение относится к категории В [82]. Основные источники возникновения пожара:

- неработоспособное электрооборудование, неисправности в проводке, розетках и выключателях;
- электрические приборы с дефектами;
- перегрузка в электроэнергетической системе и короткое замыкание в электроустановке.

Человек, выполняющий работы в аудитории, в случае возникновения пожара или его признаков (задымление, запах горения или тления различных материалов, повышение температуры и т.п.) обязан:

- немедленно сообщить об этом по телефону «01» в пожарную часть (при этом необходимо четко назвать адрес учреждения, место возникновения пожара, а также сообщить свою должность и фамилию);
- задействовать систему оповещения людей о пожаре, приступить самому и привлечь других лиц к эвакуации людей из здания в безопасное место согласно плану эвакуации;
- принять по возможности меры по тушению пожара имеющимися в учреждении средствами пожаротушения и сохранности материальных ценностей;
- известить о пожаре руководителя или другого работника.

Меры безопасности обеспечиваются системами предотвращения пожара и противопожарной защиты исходя из требований пожарной безопасности ГОСТ 12.1.004-91 [83].

Средствами обеспечения пожаробезопасности являются:

- огнетушитель, которым обеспечена аудитория, а также пожарный кран, находящийся в здании;

- системы автоматической пожарной сигнализации;

- средства организации эвакуации, в том числе технические.

Мероприятиями обеспечивающие пожаробезопасность являются:

- обучение, в т.ч. распространение знаний о пожаробезопасном поведении (о необходимости установки домашних индикаторов задымленности и хранения зажигалок и спичек в местах, недоступных детям);

- пожарный надзор, предусматривающий разработку государственных норм пожарной безопасности и строительных норм, а также проверку их выполнения;

- обеспечение оборудованием и технические разработки (установка переносных огнетушителей и изготовление зажигалок безопасного пользования).

Перед началом работы необходимо пройти инструктаж и оставить свою роспись в журнале о прохождении инструктажа по пожарной безопасности.

6.5 Заключение по разделу социальной ответственности

В разделе были рассмотрены правовые и организационные вопросы, вредные и опасные производственные факторы и их влияние на организм человека, которые могут возникнуть при разработке и эксплуатации системы, представленной в ВКР, а также мероприятия по снижению уровней их воздействия. Также затронуты проблемы экологической безопасности и безопасности в чрезвычайных ситуациях. Были изучены государственные стандарты и нормы, приведен список нормативной документации, регламентирующей рассмотренные проблемы.

Заключение

В ходе выполнения данной работы был проведён обзор существующих систем локального позиционирования, были рассмотрены инструменты и методы создания системы локального позиционирования. Была спроектирована система локального позиционирования, которая отличается от рассмотренных открытым исходным кодом и аналогов хранением данных на доверительных серверах. С помощью рассмотренных инструментов программно был создан вычислительный модуль системы локального позиционирования и проведён анализ его работы на собранном стенде из сети микроконтроллеров со встроенным Bluetooth модулем.

Помимо этого, был проведен анализ финансовой эффективности и социальной значимости проекта.

Разработанная система имеет множество путей для улучшения и доработки. Дополнительные источники информации, как например, гироскопы, акселерометры телефонов могут быть использованы для определения позиции. Система может также реализовывать иной функционал помимо позиционирования такой как, например, оповещение, сигнализация, расчёт времени пребывания, ведение статистики и истории посещения. Важным вектором развития является обеспечение безопасности данных.

По сравнению с рассмотренными существующими аналогами предложенная система имеет ряд преимуществ: масштабируемость, хранение данных на доверительном сервере и открытый исходный код. Благодаря этому разрабатываемая система предлагается к установке предприятиям и организациям, желающим разместить систему локального позиционирования на своей территории. Также, ввиду продолжающейся доработки системы и открытости исходного кода программ, все заинтересованные компании могут присоединиться к работе по усовершенствованию системы.

Conclusion

In the course of this work, a review of local positioning systems was carried out, tools and methods for creating a local positioning system were considered. A local positioning system was designed, which differs from the considered analogs with open source code and storing data on trusted servers. A computational module of the local positioning system was implemented using considered tools and an testing of its operation was carried out on the assembled stand comprised a network microcontrollers with a built-in Bluetooth module.

In addition, financial efficiency and social significance of the project was investigated.

The developed system has many ways for improvement and refinement. Additional sources of information such as gyroscopes and phone accelerometers can be included to determine position. In addition to positioning the system can also implement other functionality, such as notification, signaling, calculating the time of stay, maintaining statistics and visiting history. Data security is an important development vector.

In comparison with the considered existing analogues, the proposed system has a number of advantages: scalability, data storage on a trusted server, and open source code. Due to this, the developed system is offered for installation to enterprises and organizations wishing to place a local positioning system on their territory. Also, as far as improvement of the system is ongoing and the programs code is open source, all interested companies can join the work to improve the system.

Список использованных источников

1. (Reza) Zekavat, S. A. Handbook of Position Location, 2nd Ed. / S. A. (Reza) Zekavat, R. Michael Buehrer – Hoboken : Wiley-IEEE Press, 2019. – 1376 p. – ISBN 978-1-119-43458-0;
2. Papadakis, S. Wireless positioning using the Signal Strength Difference on Arrival / S. Papadakis, A. Traganitis. - Text : electronic // The 7th IEEE International Conference on Mobile Ad-hoc and Sensor Systems. – 2010. – P. 674-681. – DOI: 10.1109/MASS.2010.5663794;
3. Нефёдов, В. И. Теория электросвязи : учебник для СПО / В. И. Нефёдов, А. С. Сигов ; под ред. В. И. Нифёдова. — Москва : Юрайт, 2019. — 495 с. — (Серия: Профессиональное образование). — ISBN 978-5-534-01470-9;
4. Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых : официальное издание : утверждены Федеральной службой по экологическому, технологическому и атомному надзору от 08.12.2020 : введены в действие 01.01.2021. — Москва : ЦЕНТРМАГ, 2021. — 390 с. — (Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности). — ISBN 978-5-4374-1137-7;
5. О компании RealTrac Technologies : [сайт]. — Москва. — URL: <https://real-trac.com/ru/company/> (дата обращения: 05.12.2020). — Текст. Изображение : электронные;
6. Cisco Hyperlocation Solution Data Sheet : [сайт]. — Сан-Хосе, США. — URL: <https://www.cisco.com/c/en/us/products/collateral/interfaces-modules/aironet-hyperlocation-module-advanced-security/datasheet-c78-734901.html> (дата обращения: 05.12.2020). — Текст. Изображение : электронные;
7. Navigine SDK для разработки мобильных приложений с indoor-навигацией : [сайт]. — Москва. — URL: <https://nvgn.ru/platform/sdk/> (дата обращения: 05.12.2020). — Текст. Изображение : электронные;
8. Урбанович, П. П. Компьютерные сети : учеб. пособие для студентов высших учебных заведений по техническим специальностям / П. П. Урбанович,

Д. М. Романенко, Е. В. Кабак. — Минск : БГТУ, 2011. — 400 с. — ISBN 978-985-530-044-2;

9. Кузьменко, А. А. Сравнение эффективности позиционирования для сетей Bluetooth, WiFi и ZigBee / А. А. Кузьменко. — Текст : электронный // Информационные технологии и телекоммуникации. — 2015. — №2(3). — С. 53–61. — URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=24182121> (дата обращения: 05.12.2021). — Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU;

10. The Bluetooth Range Estimator : [сайт]. — Керкленд, США. — URL: <https://www.bluetooth.com/learn-about-bluetooth/bluetooth> (дата обращения: 02.08.2020). — Текст. Изображение : электронные;

11. Mautz, R. Indoor positioning technologies : major «Positioning and Engineering Geodesy» : Habilitation Thesis / Rainer Mautz — Swiss Federal Institute of Technology in Zürich — Zürich, 2012. — 129 с. — References: с. 112-129 — Text : electronic — DOI: 10.3929/ethz-a-007313554;

12. Getting Started with iBeacon, ver. 1.0 : [сайт]. — Купертино, США. — URL: <https://developer.apple.com/ibeacon/> (дата обращения: 31.08. 2020). — Текст. Изображение : электронные;

13. Rappaport, T. S. Wireless Communications: Principles and Practice, 2nd Ed. / Rappaport T. S. — Upper Saddle River : Prentice Hall, 2002. — 736 p. — ISBN 0-13-042232-0;

14. Hum, S. V. Friis' Formula and Effects / S. V. Hum. — [Toronto] : University of Toronto, 2018. — 7 p. — Text : electronic // University of Toronto: Electromagnetics Group. — URL: <https://www.waves.utoronto.ca/prof/svhum/ece422/notes/12-friiseffects.pdf> (дата обращения: 05.12.2020);

15. Сапарбеков, А. М. Исследование распространения радиоволн внутри помещений : специальность 11.04.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» : магистерская диссертация / Сапарбеков Ален Маратович ; . Сибирский государственный университет телекоммуникаций и информатики — Новосибирск, 2017. — 108 с. — Библиогр.: с. 87-90 — Текст : непосредственный;

16. Schauer L. Potentials and limitations of WIFI-positioning using Time-of-Flight / L. Schauer, F. Dorfmeister, M.Maier. - Text : electronic // International Conference on Indoor Positioning and Indoor Navigation. – 2013. – P. 1–9. – DOI: 10.1109/IPIN.2013.6817861;

17. Source Localization Using Generalized Cross Correlation : [сайт]. – Нейтик, США. – URL: <https://www.mathworks.com/help/phased/examples/source-localization-using-generalized-cross-correlation.html>, свободный (дата обращения: 05.12.2020). – Текст. Изображение : электронные;

18. Пичужкина, А. В. Метод роя частиц в задачах оптимальной ориентации спутников : специальность 03.04.01 «Прикладные математика и физика» : магистерская диссертация / Алена Викторовна Пичужкина. — Московский физико-технический институт (государственный университет) — Москва, 2017. – 35 с. – Библиогр.: с. 33 – Текст : непосредственный;

19. Time Difference of Arrival (TDoA) Localization Combining Weighted Least Squares and Firefly Algorithm / Peng Wu, Shaojing Su, Zhen Zuo [et al.]. – Text : electronic // Sensors. – 2019. – Vol. 19, №10. – P. 1-14 – DOI: 10.3390/s19112554;

20. Pivato, P. Accuracy of RSS-Based Centroid Localization Algorithms in an Indoor Environment / P. Pivato, L. Palopoli, Dario Petri. – Text : electronic // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. – 2011. – Vol. 10, №60. – P. 3451-3460 – DOI: 10.1109/TIM.2011.2134890;

21. Lovón-Melgarejo, J. Comparative Study of Supervised Learning and Metaheuristic Algorithms for the Development of Bluetooth-Based Indoor Localization Mechanisms / J. Lovón-Melgarejo, M. Castillo-Cara, O. Huarcaya-Canal, L. Orozco-Barbosa, I. García-Varea. – Text : electronic // IEEE Access. – 2019. – Vol. 7, – P. 26123-26135. – DOI: 10.1109/CW.2014.41;

22. Wu, L. A Mobile Positioning Method Based on Deep Learning Techniques / L. Wu, Ch.-H. Chen, and Q.Sh. Zhang. – Text : electronic // Electronics. – 2019. – Vol. 8, №51. – P. 1-16. – DOI: 10.3390/electronics8010059;

23. Mussina, A. Improving Indoor Positioning via Machine Learning / A. Mussina, S. Aubakirov. – Text : electronic // Proceedings of the 8th International

Conference on Data Science, Technology and Applications. – 2019. – P. 190-195. – DOI: 10.5220/0007916601900195;

24. Chan Y. T. A Simple and Efficient Estimator for Hyperbolic Location / Y. T. Chan, K. C. Ho s. – Text : electronic // IEEE Transactions on Signal Processing. – 1994. – Vol. 42, №8. – P. 1905-1915. – DOI: 10.1109/78.301830;

25. Фильтры скользящего среднего : [сайт]. – Санкт-Петербург. – URL: http://www.autex.spb.ru/analogdevices/dsp/trans/dsp_guide_rus.html (дата обращения: 05.12.2020). – Текст. Изображение : электронные;

26. Дышаев М. М. Представление торговых сигналов на основе адаптивной скользящей средней Кауфмана в виде системы линейных неравенств / М.М. Дышаев, И.М. Соколинская. – Текст : электронный // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Математическое моделирование и программирование. – 2013. – № 4 (2). – С. 103–108. – DOI: 10.14529/cmse130408;

27. Сорокин, С. В. Использование взвешенных медианных фильтров для удаления импульсного шума на изображении / С. В. Сорокин. – Текст : электронный // Модели, системы, сети в экономике, технике, природе и обществе. – 2014. – №4 (12). – С. 160–166. – URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22760954> (дата обращения: 05.12.2021). – Режим доступа: Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU;

28. Бардин Б. В. Быстрый алгоритм медианной фильтрации / Б. В. Бардин. – Текст : электронный // Научное приборостроение. – 2011. – №3 (21). – С. 135–139. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/bystryy-algoritm-mediannoy-filtratsii> (дата обращения: 05.12.2021). – Режим доступа: Научная электронная библиотека «КиберЛенинка»;

29. An Improved BLE Indoor Localization with Kalman-Based Fusion: An Experimental Study / J. Röbesaat, P. Zhang, M. Abdelaal, O.Theel. – Text : electronic // Sensors. – 2017. – Vol. 17, №9. –26 p. – DOI: 10.3390/s170509514;

30. Mekki, K. Indoor Positioning System for IoT Device based on BLE Technology and MQTT Protocol / K. Mekki1, E. Bajic, F. Meyer. – Text : electronic

// IEEE 5th World Forum on Internet of Things. – 2019. – P. 787–792. – DOI: 10.1109/WF-IoT.2019.8767287;

31. Chou L.-D. A Hierarchical Architecture for Indoor Positioning Services / L-D. Chou, Ch.-Y. Chang. – Text : electronic // Joint 2nd Workshop on Positioning, Navigation and Communication and 1st Ultra-wideband Expert Talk. – 2005. – P. 141–146;

32. Schematics of Espressif ESP32 dev boards & modules : [сайт]. – Шанхай. – URL: <https://www.esp32.com/viewtopic.php?t=344> (дата обращения: 01.04.2021). – Текст. Изображение : электронные;

33. Подбираем IDE для Java-разработчика : [сайт]. – Москва. – URL: <https://webformymself.com/podbiraem-ide-dlya-java-razrabotchika/> (дата обращения: 01.04.2021). – Текст. Изображение : электронные;

34. Динамика популярности Eclipse, IntelliJ IDEA, NetBeans, Россия, за 12 месяцев : [сайт]. – [Б. м.]. – URL: <https://trends.google.com/trends/explore?geo=RU&q=%2Fm%2F01fs1d,%2Fm%2F03v0mn,%2Fm%2F01fchg> (дата обращения: 01.04.2021). – Текст. Изображение : электронные;

35. What is JavaFX and how is it different from Swing and AWT? : [сайт]. – [Б. м.]. – URL: <https://medium.com/@japkeerat21/what-is-javafx-and-how-is-it-different-from-swing-and-awt-54de995e4869> (дата обращения: 01.04.2021). – Текст. Изображение : электронные;

36. XChart : [сайт]. – [Б. м.]. – URL: <https://github.com/knownm/XChart> (дата обращения: 01.04.2021). – Текст. Изображение : электронные;

37. jSerialComm. Platform-independent serial port access for Java : [сайт]. – [Б. м.]. – URL: <https://fazecast.github.io/jSerialComm/> (дата обращения: 01.04.2021). – Текст. Изображение : электронные;

38. Theories behind MVC, MVP, MVVM and MVI patterns in Android : [сайт]. – [Б. м.]. – URL: <https://medium.com/@royanimesh2211/theories-behind-mvc-mvp-mvvm-and-mvi-patterns-on-android-7faebe91cca5> (дата обращения: 01.04.2021). – Текст. Изображение : электронные;

39. PlantUML в двух словах : [сайт]. – [Б. м.]. – URL: <https://plantuml.com/ru/> (дата обращения: 02.04.2021). – Текст. Изображение : электронные;

40. Random Forest Regressor : [сайт]. – [Б. м.]. – URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.ensemble.RandomForestRegressor.html> (дата обращения: 02.04.2021). – Текст. Изображение : электронные;

41. SVR : [сайт]. – [Б. м.]. – URL: <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.svm.SVR.html> (дата обращения: 02.04.2021). – Текст. Изображение : электронные;

42. Introduction to Colab and Python : [сайт]. – [Б. м.]. – URL: https://colab.research.google.com/github/tensorflow/examples/blob/master/courses/udacity_intro_to_tensorflow_for_deep_learning/l01c01_introduction_to_colab_and_python.ipynb (дата обращения: 02.04.2021). – Текст. Изображение : электронные;

43. m2cgen : [сайт]. – [Б. м.]. – URL: <https://github.com/BayesWitnesses/m2cgen> (дата обращения: 02.04.2021). – Текст. Текст: электронный;

44. exp4j : [сайт]. – [Б. м.]. – URL: <https://github.com/fasseg/exp4j> (дата обращения: 02.04.2021). – Текст: электронный;

45. ДИСП.Г (функция ДИСП.Г) : [сайт]. – [Б. м.]. – URL: <https://support.microsoft.com/ru-ru/office/дисп-г-функция-дисп-г-73d1285c-108c-4843-ba5d-a51f90656f3a> (дата обращения: 02.04.2021). – Текст: электронный;

46. LOCATION BASED SERVICES in Production and Industry : [сайт]. – [Б. м.]. – URL: <http://21talks.geoit.org/wp-content/uploads/2019/02/2019-03-11-Navigine-for-GeoIT.pdf> (дата обращения: 02.04.2021). – Текст. Изображение : электронные;

47. Позиционирование персонала на промышленном предприятии, предотвращение столкновений и передача данных : [сайт]. – [Б. м.]. – URL: <https://real-trac.com/ru/solutions/production/> (дата обращения: 02.04.2021). – Текст. Изображение : электронные;

48. LOCATION BASED SERVICES in Production and Industry : [сайт]. – [Б. м.]. – URL: https://www.cisco.com/c/en/us/td/docs/wireless/controller/technotes//8-1/Halo-DG/b_hyperlocation-deployment-guide.html (дата обращения: 02.04.2021). – Текст. Изображение : электронные;

49. Как выполняется SWOT-анализ : [сайт]. – [Б. м.]. – URL: <https://ivan-shamaev.ru/doing-swot-analysis/> (дата обращения: 20.05.2021). – Текст. Изображение : электронные;

50. Лущикова А. П. Планирование на предприятии : учебное пособие / А. П. Лущикова; под редакцией Е. В. Заболотникова. — Прокопьевск: ОАО «Новокузнецкий полиграфкомбинат», 2008. – 102 с. – Текст : электронный // Единое окно доступа к образовательным ресурсам URL: <http://window.edu.ru/resource/832/66832>;

51. Планирование проекта: [сайт]. – [Б. м.]. – <https://svprint34.ru/biznes/planirovanie-proekta>: САЙТ (дата обращения: 20.05.2021). – Текст. Изображение : электронные;

52. Российская Федерация. Законы. Трудовой кодекс Российской Федерации : ТК : текст с изменениями и дополнениями на 30 апреля 2021 года : [принят Государственной думой 21 декабря 2001 года : одобрен Советом Федерации 26 декабря 2001 года]. – Москва. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901807664> (дата обращения: 20.04.2020). – Текст : электронный;

53. Производственный календарь на 2021 год : [сайт]. – Москва. – URL: <http://duma.gov.ru/news/49744/> (дата обращения: 20.05.2021). – Текст. Изображение : электронные;

54. Бюджетирование проекта: [сайт]. – [Б. м.]. – URL: <https://www.1cashflow.ru/byudzhetrovanie-proekta> (дата обращения: 20.05.2021). – Текст. Изображение : электронные;

55. ESP-32 макетная плата : [сайт]. – [Китай]. – URL: <https://aliexpress.ru/item/32834130422.html> (дата обращения: 20.05.2021). – Текст. Изображение : электронные;

56. Провод МГШВ 1х0.12 мм² синий : [сайт]. – Томск. – URL: [http://elgrad.pro/provod-montazhnij-mgshv-1h012-mm2-\[sinij\]](http://elgrad.pro/provod-montazhnij-mgshv-1h012-mm2-[sinij]) (дата обращения: 20.05.2021). – Текст. Изображение : электронные;

57. Шнур интерфейсный шт.-шт. USB AM / USB micro M 1.8 м: [сайт]. – Томск. – URL: <http://elgrad.pro/shnur-microusb-m-usb-a-m> (дата обращения: 20.05.2021). – Текст. Изображение : электронные;

58. Плита пенополистирольная ППС-9-Р-А 100х100х3см: [сайт]. – Томск. – URL: <https://stroypark.su/good/11042101> (дата обращения: 20.05.2021). – Текст. Изображение : электронные;

59. Хомут (стяжка) 3.6 мм/292 мм, нейлон, 1 шт.: [сайт]. – Томск. – URL: <http://elgrad.pro/homut-styazhka-36-292> (дата обращения: 20.05.2021). – Текст. Изображение : электронные;

60. Многофункциональный концентратор USB2.0/3.1 х 6 + CardReader : [сайт]. – [Б. м.]. – URL: <https://2emarket.ru/mnogofunktsionalnyy-kontsentrator-usb2-0-x-6-cardreader/> (дата обращения: 20.05.2021). – Текст. Изображение : электронные;

61. Ноутбук Echips Simple: [сайт]. – [Б. м.]. – URL: https://market.yandex.ru/offer/o9n5Ig_UtH7foG5KsFvAcQ (дата обращения: 20.05.2021). – Текст. Изображение : электронные;

62. Мультиметр цифровой RGK DM-30 : [сайт]. – [Б. м.]. – URL: <https://market.yandex.ru/product--multimetr-tsifrovoy-rgk-dm-30/758097004> (дата обращения: 20.05.2021). – Текст. Изображение : электронные;

63. Паяльная станция REXANT 12-0724, 600 Вт черный : [сайт]. – [Б. м.]. – URL: <https://market.yandex.ru/offer/SIGKJoh9704QWDggSA2OJw> (дата обращения: 20.05.2021). – Текст. Изображение : электронные;

64. Об установлении размера должностных окладов по отдельным профессиональным квалификационным группам : приказ ректора Национального исследовательского Томского политехнического университета. – Томск. – URL:

https://portal.tpu.ru/SHARED/o/OSTRAYA/Ucheba/VKR/Должностные%20оклады.%20Приказ_№_16.pdf (дата обращения: 20.05.2021). – Текст : электронный;

65. Российская Федерация. Законы. Налоговый кодекс Российской Федерации (часть вторая) : НК : текст с изменениями и дополнениями на 20 апреля 2021 года : [принят Государственной думой 19 июля 1998 года : одобрен Советом Федерации 26 июля 1998 года]. – Москва. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901765862> (дата обращения: 20.04.2020). – Текст : электронный;

66. Российская Федерация. Законы. О промышленной безопасности опасных производственных объектов : Федеральный закон № 116-ФЗ: [принят Государственной думой 20 июня 1997 года]. – Москва. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/9046058> (дата обращения: 10.05.2021). – Текст : электронный;

67. Российская Федерация. Законы. Технический регламент о требованиях пожарной безопасности : Федеральный закон № 123-ФЗ: [принят Государственной думой 4 июля 2008 года : одобрен Советом Федерации 11 июля 2008 года]. – Москва. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/902111644> (дата обращения: 10.05.2021). – Текст : электронный;

68. ГОСТ Р ИСО 11611-2011. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Одежда специальная для защиты от искр и брызг расплавленного металла при сварочных и аналогичных работах. Технические требования: дата введения 2012-12-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200085790> (дата обращения: 10.05.2021). – Текст : электронный;

69. Технический регламент Таможенного союза 019/2011. О безопасности средств индивидуальной защиты: дата введения 9 декабря 2011. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/902320567> (дата обращения: 10.05.2021). – Текст : электронный;

70. СП 2.2.3670-20. Система «Человек-машина». Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда: дата введения 2 декабря

2020. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/573230583> (дата обращения: 10.05.2021). – Текст : электронный;

71. ГОСТ 12.2.032-78. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования: дата введения 1979-01-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003913> (дата обращения: 10.05.2021). – Текст : электронный;

72. ГОСТ 21889-76. Система «Человек-машина». Кресло человека-оператора. Общие эргономические требования: дата введения 1977-07-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200012832> (дата обращения: 10.05.2021). – Текст : электронный;

73. ГОСТ 12.0.003-2015. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Опасные и вредные производственные факторы. Классификация: дата введения 2017-03-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200136071> (дата обращения: 10.05.2021). – Текст : электронный;

74. ГОСТ 12.1.019-2017. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты: дата введения 2019-01-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200161238> (дата обращения: 10.05.2021) – Текст : электронный;.

75. ГОСТ 12.1.045-84. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Электростатические поля. Допустимые уровни на рабочих местах и требования к проведению контроля: дата введения 1985-07-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/9051575> (дата обращения: 10.05.2021). – Текст : электронный;

76. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение : дата введения 2017-05-08. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/456054197> (дата обращения: 10.05.2021). – Текст : электронный;

77. СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания: дата введения 28 января 2021). – Текст : электронный; – URL:

<https://docs.cntd.ru/document/573500115> (дата обращения: 10.05.2021). – Текст : электронный;

78. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений : дата введения 1985-07-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/901704046> (дата обращения: 10.05.2021). – Текст : электронный;

79. ГОСТ 12.1.007-76. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности : дата введения 1977-01-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/5200233> (дата обращения: 10.05.2021). – Текст : электронный;

80. ГОСТ 12.1.005. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны : дата введения 1989-01-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200003608> (дата обращения: 10.05.2021). – Текст : электронный;

81. ГОСТ 12.1.003-2014. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Шум. Общие требования безопасности : дата введения 2015-11-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200118606> (дата обращения: 10.05.2021). – Текст : электронный;

82. НПБ 105-03. Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности : дата введения 2003-08-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200032102> (дата обращения: 10.05.2021). – Текст : электронный;

83. ГОСТ 12.1.004-91. Система стандартов безопасности труда (ССБТ). Пожарная безопасность. Общие требования : дата введения 1992-07-01. – URL: <https://docs.cntd.ru/document/9051953> (дата обращения: 10.05.2021);

Приложение А
(обязательное)
Алгоритмы работы станций



Рисунок А.1 – Блок-схема программы искомой станции

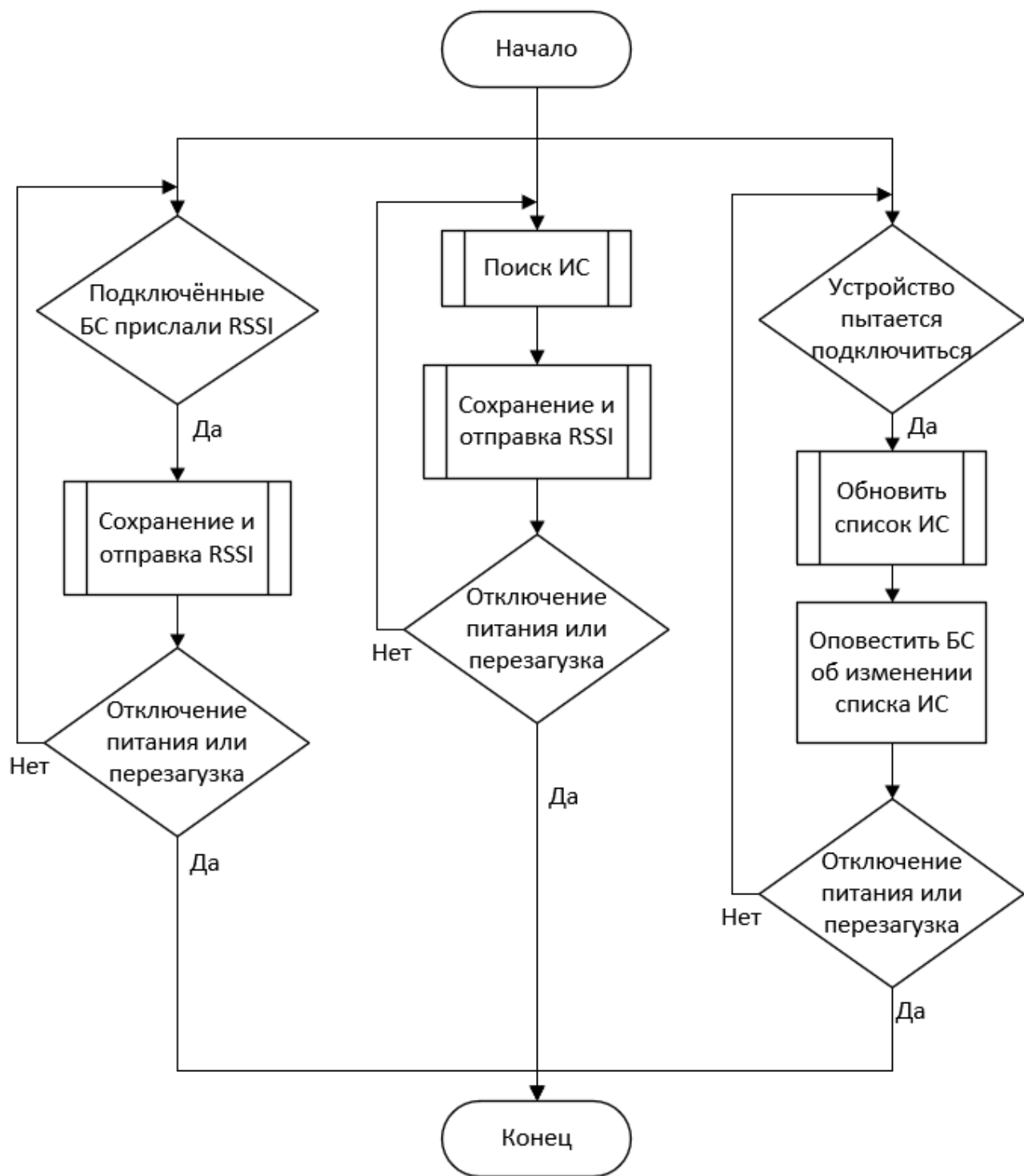


Рисунок А.2 – Блок-схема программы главной базовой станции

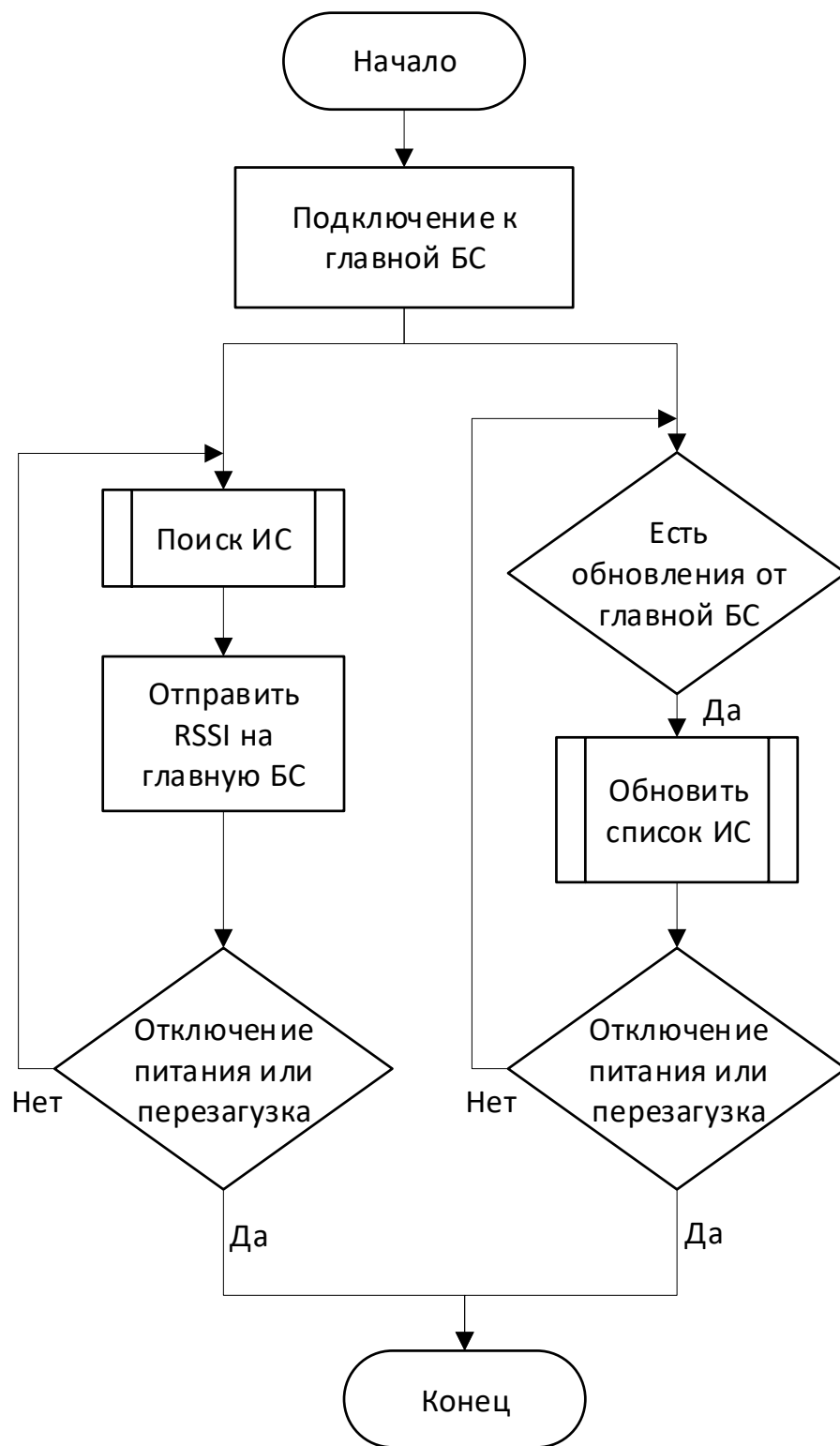


Рисунок А.3 – Блок-схема программы дополнительной базовой станции

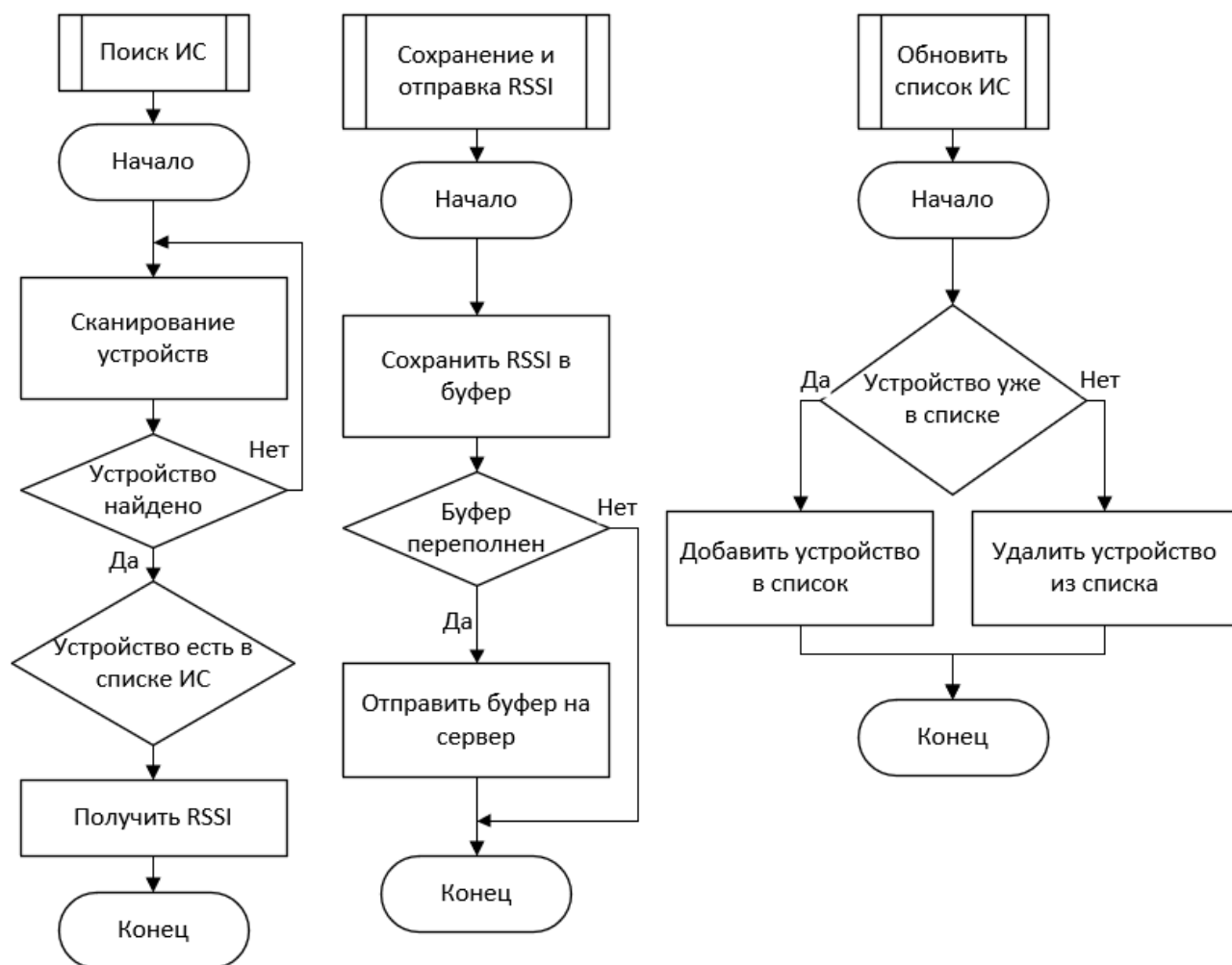


Рисунок А.4 – Блок-схемы predetermined процессов